

Impacts de l'élargissement de l'axe routier 73/175 sur le caribou forestier de Charlevoix



**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 

Impacts de l'élargissement de l'axe routier 73/175 sur le caribou forestier de Charlevoix



Novembre 2014

Direction de la faune terrestre et de l'avifaune
Direction générale de l'expertise sur la faune et ses habitats
Secteur de la faune et des parcs

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Auteurs : Mathieu Leblond
Université du Québec à Rimouski

Christian Dussault
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Jean-Pierre Ouellet
Université du Québec à Rimouski

Référence à citer :

Leblond, M., C. Dussault et J.-P. Ouellet. 2014. *Impacts de l'élargissement de l'axe routier 73/175 sur le caribou forestier de Charlevoix*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la faune terrestre et de l'avifaune, et Université du Québec à Rimouski, 95 pages.

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014

ISBN : 978-2-550-71801-7 (version imprimée)

978-2-550-71802-4 (version PDF)

RÉSUMÉ

Un projet de réfection visant à élargir l'axe routier 73/175 (ici appelé route 175) et à modifier son tracé afin de lui donner un gabarit de type autoroutier a été amorcé en 2006. Puisque cette route traverse la réserve faunique des Laurentides et l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix, une petite population isolée dont la conservation à long terme est menacée, le ministère des Transports du Québec s'est associé avec le ministère des Ressources naturelles et de la Faune ainsi que l'Université du Québec à Rimouski pour réaliser un projet de recherche visant à évaluer les impacts du chantier et de l'élargissement de la route 175 sur le comportement et la survie du caribou forestier de Charlevoix.

Pour que puissent être évalués les changements comportementaux du caribou forestier induits par la nouvelle route, plusieurs individus ont été capturés et équipés de colliers GPS. Au total, 59 individus ont été suivis au cours de l'étude, qui s'est étalée sur une période de huit ans (2004-2011). Le nombre d'individus suivis par télémétrie était en moyenne de 25 par année. Autant que possible, les mêmes individus ont été suivis pour toute la durée du projet de recherche, afin de permettre la comparaison du comportement des individus avant, pendant et après la réfection. Cette longue série temporelle de données télémétriques a permis d'explorer plusieurs facettes de l'écologie des caribous forestiers.

Utilisation de l'espace. – Les caribous forestiers ont utilisé des domaines vitaux annuels d'une superficie de 491 km² en moyenne. Ces très grands domaines vitaux ont augmenté la probabilité que les caribous forestiers entrent en contact avec le réseau routier. Seulement 34 des 197 domaines vitaux annuels (17 %) incluaient la route 175, et la plupart des individus sont demeurés exclusivement du côté est de la route 175, sans la traverser. De plus, les caribous forestiers incluaient de moins en moins la route 175 dans leur domaine vital annuel à mesure que les travaux d'élargissement avançaient. Ces observations indiquent que plusieurs caribous forestiers ont évité la route 175 à l'échelle du paysage.

Traversées de la route 175. – Seulement 13 des 59 caribous forestiers suivis (22 %) ont traversé la route 175 au moins une fois entre 2004 et 2012, pour un total de 105 traversées. L'utilisation de l'emprise des lignes de transport d'énergie explique les traversées de certains de ces individus. Le secteur situé entre les bornes kilométriques 115 et 125 a été traversé 61 fois; ce secteur permet donc la majorité des échanges entre les côtés est et ouest de la route. Le taux de traversées de la route 175, bien que déjà faible avant le début du chantier, a tout de même eu tendance à diminuer au cours des années, pendant et après les travaux.

Influence du trafic sur le comportement. – Un indice de trafic horaire moyen a été calculé sur la base des données recueillies par un compteur situé au centre de l'aire d'étude. Cet indice a permis de constater que les caribous forestiers ne choisissent pas les moments où le dérangement humain est le plus faible pour traverser la route 175 ou pour fréquenter ses abords. Toutefois, ils ont traversé la route 175 avec un taux de déplacement (mesuré en m/h) significativement plus élevé durant les périodes où le trafic était plus dense.

Sélection d'habitat avant la réfection. – Des fonctions de sélection des ressources ont été testées à partir des données collectées de 2004 à 2006. Ces analyses ont été réalisées dans le but de déterminer la meilleure échelle spatiale pour évaluer la sélection d'habitat du caribou forestier avant les travaux de la route 175. La meilleure échelle retenue variait selon les saisons et les variables d'habitat. Ainsi, la perception et la réponse des caribous forestiers par rapport aux ressources et aux contraintes de leur habitat semblaient différer selon leurs propres besoins et en fonction de l'hétérogénéité des ressources dans le paysage. Plus précisément, les caribous forestiers ont évité les routes asphaltées et les chemins forestiers aux deux principales échelles analysées, soit à l'échelle locale et à l'échelle paysagère. Les localisations télémétriques se trouvaient donc à une distance significativement plus élevée des routes que les localisations aléatoires (échelle locale), et la densité des routes était plus faible autour des localisations télémétriques qu' autour des localisations aléatoires (échelle paysagère).

Sélection d'habitat pendant et après la réfection. – Des fonctions de sélection des ressources ont par la suite été réalisées sur la base des données télémétriques recueillies durant l'ensemble du projet de recherche (2004-2011). Ces analyses ont démontré que les caribous forestiers évitaient significativement la route 175 à l'échelle de leur domaine vital annuel, ainsi que les zones à proximité de la route 175 (1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d'autre de la route). À l'intérieur de ces zones, les caribous forestiers ont évité toutes les classes d'habitat (sauf les milieux humides à 5 000 m), même celles qu'ils sélectionnaient ailleurs dans leur domaine vital annuel. De plus, les caribous forestiers ont diminué leur fréquentation des abords de la route 175 pendant et après les travaux de réfection. Ces résultats suggèrent que le dérangement occasionné par la route 175 a détérioré la qualité de l'habitat perçue par le caribou forestier jusqu'à 5 000 m de la route.

Impacts de la route sur la performance individuelle. – La stratégie d'évitement des routes semble offrir au caribou forestier une protection adéquate contre la mortalité directe sur la route. En effet, aucun individu porteur de collier GPS n'a été impliqué dans une collision routière au cours de l'étude. Toutefois, des analyses de survie ont démontré que la probabilité de mourir par prédation durant l'année était plus élevée pour les individus ayant établi leur domaine vital annuel dans des régions récemment aménagées par des activités de coupe forestière ou dans des régions où les densités de routes étaient élevées. Ainsi, les routes semblent porter atteinte à la survie des caribous forestiers en facilitant leur capture par le loup gris.

Ce projet de recherche a permis d'établir que la route 175 avait déjà une influence sur le comportement du caribou forestier avant le début du chantier. Toutefois, les travaux d'élargissement ont amplifié les réactions du caribou forestier par rapport à la route 175. Le réseau routier et les coupes forestières ont aussi affecté la survie des caribous forestiers en augmentant la probabilité qu'ils soient capturés par un prédateur. Les routes en général, et le projet de réfection de la route 175 en particulier, ont donc entraîné des impacts négatifs pour le caribou forestier de Charlevoix. Dans ce rapport, les implications de ces résultats pour la conservation du caribou forestier de Charlevoix sont discutées, et des recommandations à l'intention des gestionnaires du territoire sont formulées.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	xi
1. Introduction	1
2. Bilan des captures de caribous forestiers et du suivi télémétrique.....	5
3. Caractérisation de l'habitat du caribou forestier.....	15
4. Réfection de la route 175 et design expérimental.....	16
5. Utilisation de l'espace par le caribou forestier	19
5.1 Superficie des domaines vitaux annuels.....	19
5.2 Localisation des domaines vitaux annuels.....	20
5.3 Superficie des domaines vitaux saisonniers	21
5.4 Déplacements des caribous forestiers dans l'aire d'étude	22
6. Traversées de la route 175 par le caribou forestier.....	24
6.1 Répartition spatiale des traversées de la route 175.....	24
6.2 Répartition temporelle des traversées de la route 175.....	28
6.3 Impacts de la route 175 sur les déplacements du caribou forestier	29
7. Influence du trafic sur le comportement du caribou forestier	33
8. Sélection d'habitat multiéchelle du caribou forestier.....	36
8.1 Sélection d'habitat du caribou forestier avant la réfection de la route	37
8.2 Sélection d'habitat du caribou forestier pendant et après la réfection de la route	50
9. Performance individuelle et survie du caribou forestier.....	55
9.1 Survie des caribous forestiers à large échelle.....	56
9.2 Survie des caribous forestiers à fine échelle.....	59
9.3 Succès reproducteur des femelles caribous forestiers à large échelle	63
9.4 Dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace par les caribous forestiers à large échelle	64
10. Bilan	67

11.	Conclusion et recommandations.....	72
12.	Références	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Nombre de caribous forestiers de Charlevoix suivis par télémétrie GPS ou VHF de 2004 à 2011, dans le cadre du projet de recherche sur les impacts de la réfection de la route 175 (2007-2011) ainsi que d'un projet antérieur (2004-2006).....	7
Tableau 2. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2007.	8
Tableau 3. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2008.	9
Tableau 4. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2009.	10
Tableau 5. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2010.	11
Tableau 6. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2011.	12
Tableau 7. Liste des caribous forestiers de Charlevoix suivis par télémétrie GPS dans le cadre du projet de recherche sur les impacts de la réfection de la route 175. Une case de couleur indique que l'animal était suivi durant l'année en question. La couleur rouge indique que l'individu est mort en cours d'année.	13
Tableau 8. Classes d'habitat utilisées pour étudier la sélection d'habitat du caribou forestier de Charlevoix et proportion des localisations télémétriques (2004-2006) qui se trouvaient dans chaque classe.	16
Tableau 9. Longueur de la route 175 traversant l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix, par année et par statut de réfection. Les chantiers de réfection ont débuté au plus tôt en 2006 et se sont terminés au plus tard en 2010.....	17
Tableau 10. Localisation des domaines vitaux annuels des caribous forestiers de Charlevoix par rapport à la route 175, en nombre d'individus-années, de 2004 à 2011.....	21
Tableau 11. Nombre de traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2012 et nombre d'individus ayant fait ces traversées.	25
Tableau 12. Répartition temporelle des traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix de 2004 à 2012, selon la saison ($n = 105$ traversées). Voir la figure 4 pour connaître la définition de chaque saison.	28
Tableau 13. Nombre annuel de traversées/km et de traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix, pour chaque état de route. Le nombre de traversées/km observé sur la route 175 a été comparé au taux de traversées sur 1 000 routes virtuelles distribuées aléatoirement dans l'aire de répartition de la population à l'aide de tests de t . Basé sur les données 2004-2010.....	31

Tableau 14. Estimés de paramètres des régressions log-linéaires évaluant l’influence de la densité de trafic sur la fréquence des localisations de caribous forestiers de Charlevoix trouvées dans chaque zone le long de la route 175 (1 250, 2 500 et 5 000 m). Un estimé de paramètre positif signifie que le nombre de localisations est plus élevé dans une zone donnée lorsque la densité de trafic est supérieure à la médiane de 186 v/h.....	35
Tableau 15. Support relatif des différents modèles de sélection d’habitat par le caribou forestier de Charlevoix utilisant des distances tronquées aux routes actives et aux chemins forestiers. La log-vraisemblance (LL) et la différence entre chaque modèle et le meilleur modèle selon le critère BIC (Δ BIC) sont présentées.	39
Tableau 16. Support relatif des modèles déterminant la meilleure échelle de sélection pour chaque variable expliquant la sélection d’habitat saisonnière du caribou forestier de Charlevoix avant la réfection de la route 175, de 2004 à 2006. Le nombre de localisations télémétriques (n), le nombre de paramètres (k) et les différences de BIC (Δ BIC) intragroupes (même variable, échelles différentes) et intergroupes (variables différentes, même meilleure échelle) sont présentés. Les valeurs de Δ BIC des modèles intragroupes et intergroupes retenus sont en caractères gras.	43
Tableau 17. Support relatif des modèles de sélection d’habitat saisonnière par le caribou forestier de Charlevoix avant la réfection de la route 175, de 2004 à 2006. L’échelle utilisée pour mesurer chaque variable était la meilleure, comme déterminé au tableau 16. Les valeurs de Δ BIC des modèles saisonniers retenus sont en caractères gras.	46
Tableau 18. Estimés de paramètres (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95%) des meilleurs modèles expliquant la sélection d’habitat saisonnière du caribou forestier de Charlevoix avant la réfection de la route 175, de 2004 à 2006. L’échelle utilisée pour mesurer chaque variable était la meilleure, comme déterminé au tableau 16. Les résultats de la validation (corrélation de Spearman, r) sont également présentés. Il est à noter qu’un coefficient supérieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie une sélection, tandis qu’un coefficient inférieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie un évitement, sauf pour les variables de distance aux routes, pour lesquelles l’interprétation est inversée.	47
Tableau 19. Estimés de paramètres (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) des modèles expliquant la sélection d’habitat du caribou forestier de Charlevoix, de 2004 à 2010. Un modèle global a été estimé en utilisant l’ensemble des localisations télémétriques, puis des modèles ont été estimés dans des zones de 1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d’autre de la route 175. Les résultats de la validation (corrélation	

de Spearman, r) sont également présentés. Il est à noter qu'un coefficient supérieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie une sélection, tandis qu'un coefficient inférieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie un évitement, sauf pour les variables de distance aux routes, pour lesquelles l'interprétation est inversée.	52
Tableau 20. Estimés des paramètres des régressions log-linéaires évaluant l'influence de l'état d'avancement des travaux de réfection de la route 175 sur la fréquence des localisations de caribous forestiers de Charlevoix trouvées dans chaque zone de part et d'autre de la route 175 (1 250, 2 500 et 5 000 m). Un estimé de paramètre négatif signifie que le nombre de localisations était plus faible que durant l'état de référence, soit avant le début des travaux de réfection.....	54
Tableau 21. Nombre de caribous forestiers de Charlevoix suivis par télémétrie VHF de 1999 à 2001 et inclus dans les analyses portant sur la relation entre la survie et la composition du domaine vital annuel des caribous forestiers de Charlevoix.....	56
Tableau 22. Nombre de caribous forestiers suivis par télémétrie VHF (1999-2001) ou GPS (2004-2011) dans Charlevoix, par année. Le nombre d'individus morts inclut toutes les causes de mortalité (prédation, naturelle, accidentelle ou inconnue). Les individus perdus étaient soit volontairement relâchés sans collier, soit équipés de colliers défectueux. La taille de la population a été estimée par des inventaires aériens (St-Laurent et Dussault, 2012).....	57
Tableau 23. Coefficients de régression (β), indice de risque (<i>hazard ratio</i>) et intervalle de confiance à 95 % de l'indice de risque (IC 95 %) du modèle le plus parcimonieux expliquant la relation entre la survie annuelle et la composition du domaine vital annuel chez le caribou forestier de Charlevoix, de 1999 à 2011. Les cellules vides indiquent les variables d'habitat non retenues dans le modèle le plus parcimonieux.	58
Tableau 24. Estimés des paramètres moyens (β) et intervalles de confiance à 90 % (IC 90 %) des modèles expliquant la sélection d'habitat à fine échelle des caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2011. Ces modèles comparent la sélection d'habitat des individus morts par prédation 15, 10 et 5 jours avant leur mort à celle des individus vivants durant la même période. Les estimés de paramètres en effet simple représentent la sélection d'habitat des individus vivants, et les estimés de paramètre en interaction représentent la sélection d'habitat des individus morts par prédation.	61

Tableau 25. Coefficients de régression (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) des modèles expliquant la relation entre la composition du domaine vital annuel et le succès reproducteur des femelles caribous forestiers de Charlevoix.....64

Tableau 26. Coefficients de régression (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) des modèles expliquant la relation entre la composition du domaine vital annuel et les dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace par le caribou forestier de Charlevoix.66

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la réserve faunique des Laurentides et des parcs nationaux de la Jacques-Cartier, des Grands-Jardins et des Hautes-Gorges-de-la-Rivière-Malbaie, entre les villes de Québec et de Saguenay, où le projet de recherche étudiant les impacts de la route 175 sur le caribou forestier de Charlevoix s'est déroulé.	2
Figure 2. Carte de l'aire d'étude montrant la route 175 traversant l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix. Le contour des parcs nationaux et les localisations télémétriques des caribous forestiers équipés de colliers GPS de 2004 à 2012 sont également présentés.....	4
Figure 3. Représentation des zones de 1 250 m (ici en hachuré), 2 500 m et 5 000 m de part et d'autre de la route 175 utilisées dans certaines analyses pour caractériser les impacts de la route sur le comportement du caribou forestier de Charlevoix.	18
Figure 4. Dates de début et de fin des saisons utilisées pour décrire le comportement des caribous forestiers de Charlevoix.....	21
Figure 5. Patron général des principaux sites utilisés et des déplacements des caribous forestiers de Charlevoix, de 2004 à 2011. Les flèches rouges représentent les principaux déplacements effectués à la fin de l'hiver et au printemps. Ces déplacements sont généralement suivis plus tard dans l'année d'un retour vers les sites d'hivernage. Les flèches bleues représentent les principaux déplacements effectués en hiver. La largeur des flèches représente l'importance relative de ces mouvements parmi les individus de la population. LTE = emprise des lignes de transport d'énergie.....	23
Figure 6. Carte présentant la localisation de l'ensemble des traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2012 ($n = 105$ traversées).	26
Figure 7. Carte présentant la localisation des traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2012 entre les bornes kilométriques 115 et 125 ($n = 61$ traversées).	27
Figure 8. Répartition des traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix de 2004 à 2012, selon le jour de la semaine ($n = 105$ traversées).	29
Figure 9. Répartition des traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix de 2004 à 2012, selon l'heure de la journée ($n = 105$ traversées).	29

Figure 10. Taux de déplacement moyen (m/h + erreur-type) des caribous forestiers de Charlevoix lors de la traversée de la route 175 (T_0), ainsi que lors des cinq pas précédant (T_{-1} à T_{-5}) et des cinq pas suivant (T_{+1} à T_{+5}) la traversée. Les barres d’histogramme avec des lettres différentes sont significativement différentes. Basé sur les données de 2004 à 2010 ($n = 93$ traversées).33

Figure 11. Horaire des traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix, de 2004 à 2012 (mêmes données que la figure 9), en fonction du nombre moyen de véhicules par heure horaire moyen () mesuré en 2004.35

1. Introduction

La région du Saguenay–Lac-Saint-Jean compte plus de 300 000 habitants, et l’axe routier 73/175 (ci-après nommé route 175) représente son principal lien avec la ville de Québec et le réseau autoroutier québécois. Au cours des années 1990, le nombre d’accidents sur cette route et leur gravité ont augmenté, à tel point que la crainte suscitée a engendré un mouvement populaire réclamant une autoroute à chaussées divisées (Bédard, 2012). Dans le but d’améliorer la sécurité des automobilistes, et pour soutenir l’économie régionale, les gouvernements provincial et fédéral ont annoncé un projet de réfection visant à modifier le tracé de la route 175 afin de lui donner un gabarit de type autoroutier. Les travaux ont été amorcés en 2006, après l’adoption de décrets gouvernementaux du ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs (MDDEP).

Les objectifs du projet de réfection étaient d’améliorer les conditions routières et la fluidité du trafic en élargissant le corridor routier, en construisant des voies séparées par un terre-plein central et en modifiant le tracé à certains endroits dangereux. La nouvelle route aurait une emprise trois fois plus large que l’ancienne (de 25 m avant à 90 m après, en moyenne), et le ministère des Transports du Québec (MTQ) prévoyait qu’elle supporterait une densité de trafic accrue. Cet élargissement de la route 175 impliquait toutefois des travaux de grande envergure en plein cœur de la réserve faunique des Laurentides, un vaste territoire naturel voué à la conservation et à la mise en valeur de la faune (figure 1).

L’un des enjeux majeurs des décrets gouvernementaux touchait la conservation du caribou forestier (*Rangifer tarandus caribou*) de Charlevoix, dont l’aire de répartition est traversée du sud au nord par la route 175 sur une distance de 95,5 km (figure 2). Cette population a été réintroduite dans son aire de répartition historique à la fin des années 1960 (Jolicœur, 1993) et elle a atteint sa taille maximale au début des années 1990, alors que 126 individus ont été répertoriés lors d’un inventaire aérien (Banville, 1998). Le nombre d’individus au sein de la population a ensuite diminué. Il était de 70 à 80 individus environ au début des

années 2000 et il est demeuré relativement stable par la suite (Sebbane et collab., 2002; St-Laurent et Dussault, 2012).

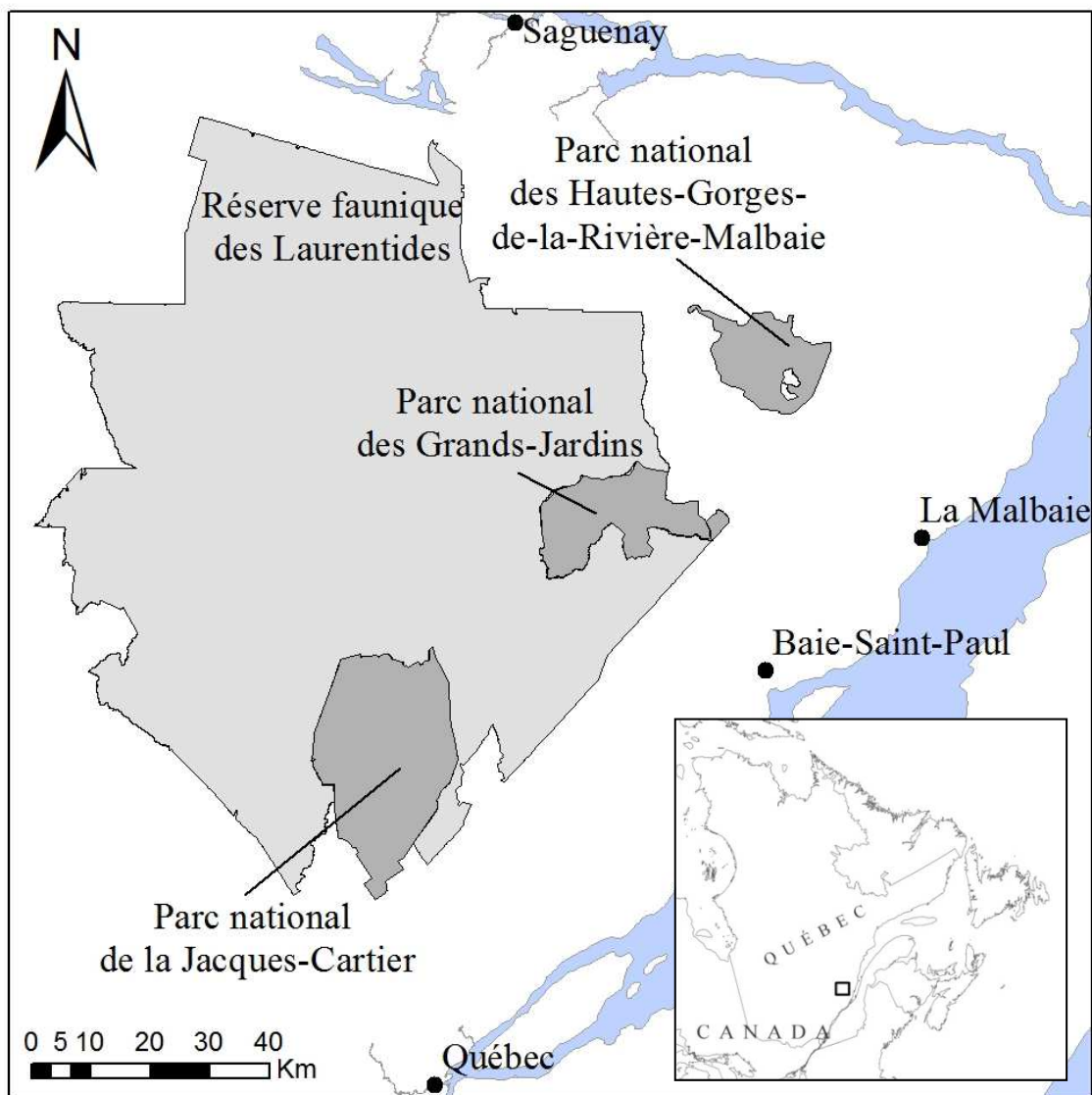


Figure 1. Localisation de la réserve faunique des Laurentides et des parcs nationaux de la Jacques-Cartier, des Grands-Jardins et des Hautes-Gorges-de-la-Rivière-Malbaie, entre les villes de Québec et de Saguenay, où le projet de recherche étudiant les impacts de la route 175 sur le caribou forestier de Charlevoix s'est déroulé.

La nouvelle route 175 plus large et les chantiers de construction étaient susceptibles d'influer sur le comportement des caribous forestiers et de menacer leur conservation. En effet, on craignait que la nouvelle route limite l'accessibilité de certains habitats propices et affecte l'efficacité du caribou forestier à éviter ses principaux prédateurs, le loup gris (*Canis lupus*) et l'ours noir (*Ursus americanus*). Le MTQ s'est donc associé avec le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) et l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour réaliser un projet de recherche visant à évaluer les impacts de la modification de la route 175 sur le caribou forestier de Charlevoix.

Le projet de recherche a débuté officiellement au printemps 2006 et les opérations de terrain ont cessé au printemps 2012. L'objectif de ce rapport est de présenter l'ensemble des résultats obtenus au cours des cinq années qu'a duré le suivi de cette population (2007-2011). Afin de mieux évaluer les changements comportementaux du caribou forestier provoqués par la nouvelle route, nous avons pu bénéficier de données télémétriques sur le caribou forestier de Charlevoix recueillies dans le cadre d'un projet antérieur s'étant déroulé durant les trois années précédant notre projet de recherche. Ainsi, le suivi télémétrique de cette population s'étend sur un total de huit années complètes, de 2004 à 2011 inclusivement. Cette base de données offre une occasion unique d'évaluer les impacts de l'élargissement d'un axe routier majeur sur le comportement et la survie du caribou forestier en utilisant une approche robuste de comparaison avant-pendant-après (Roedenbeck et collab., 2007).

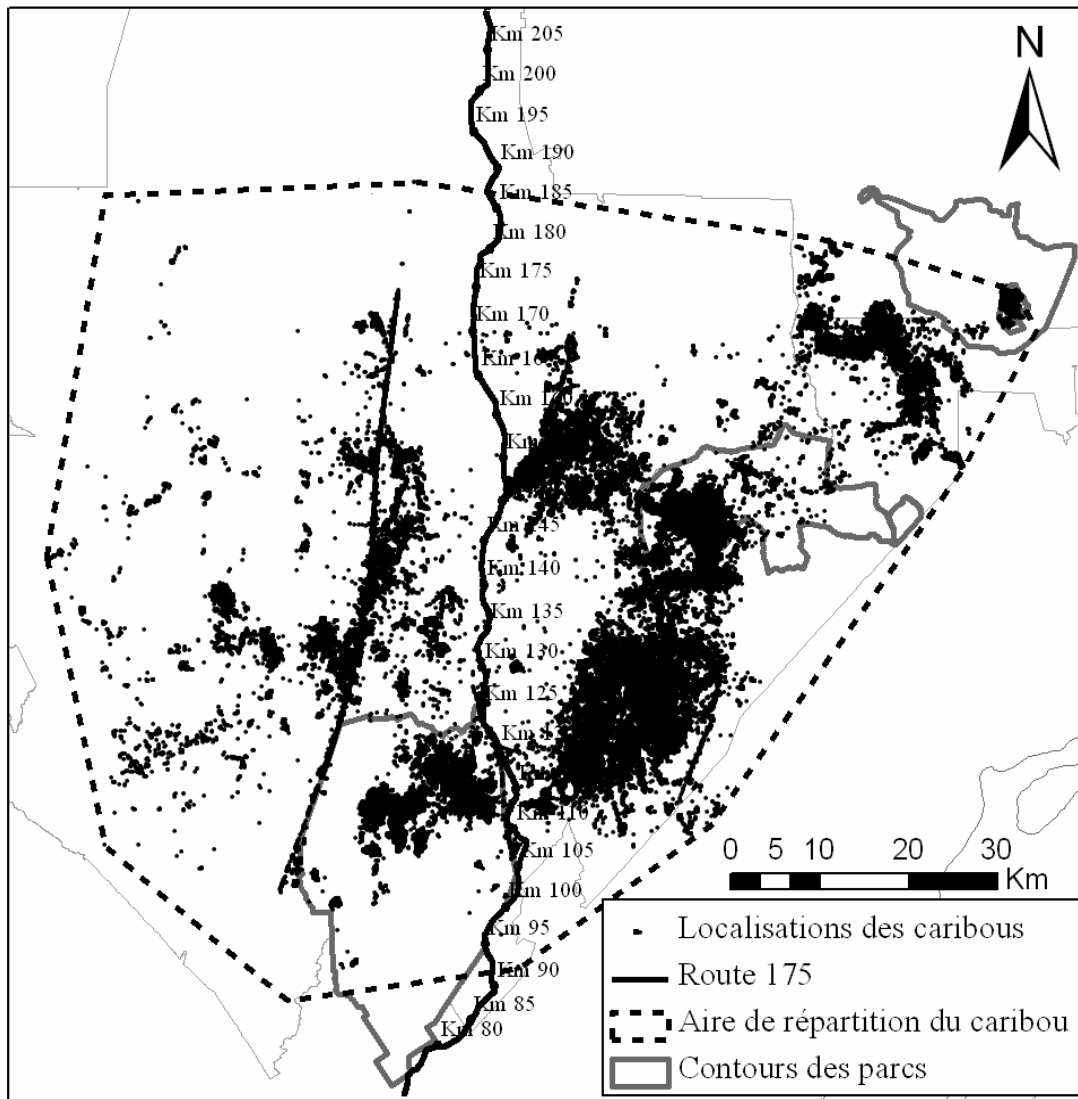


Figure 2. Carte de l'aire d'étude montrant la route 175 traversant l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix. Le contour des parcs nationaux et les localisations télémétriques des caribous forestiers équipés de colliers GPS de 2004 à 2012 sont également présentés.

2. Bilan des captures de caribous forestiers et du suivi télémétrique

Afin d'atteindre les objectifs du projet de recherche, nous avons capturé des caribous forestiers et les avons munis de colliers GPS (*global positioning system*). Le projet nécessitait de capturer un nombre suffisant d'individus qui fréquentaient la route 175 et ses abords. Nous avons donc capturé les individus les plus susceptibles d'utiliser la route 175, en nous basant sur des suivis télémétriques antérieurs. Pour des raisons de logistique découlant du projet de recherche précédent (2004-2006), nous avons d'abord capturé des femelles adultes et des juvéniles lors de la première année de capture, en 2007. À partir de la deuxième année, nous avons capturé aussi bien des mâles que des femelles. En effet, presque aucune information sur le comportement des caribous forestiers mâles n'était disponible, bien qu'il soit reconnu chez les ongulés que les mâles et les femelles se comportent différemment à plusieurs égards (Main, 2008). Il s'agissait de la première campagne de marquage importante sur des caribous forestiers mâles au Québec. Les mêmes individus furent suivis durant toute la durée du projet et furent recapturés tous les deux ans pour télécharger les données, changer les piles et, dans certains cas, remplacer un collier défectueux.

Les caribous forestiers étaient capturés en hélicoptère (modèle Astar 350BA) durant l'hiver à l'aide d'un lance-filet (Potvin et Breton, 1988), ou exceptionnellement durant l'été à l'aide d'un fusil à fléchettes et d'un produit immobilisant. Une fois l'animal immobilisé, il était rejoint immédiatement par l'équipe de capture et un bandeau était placé sur ses yeux. L'équipe procédait alors à la pose du collier GPS et d'une ou deux étiquettes d'identification aux oreilles. La plupart des caribous forestiers adultes étaient équipés d'un collier GPS (modèle TGW 3600 de Telonics Inc., Mesa, AZ, É.-U.; environ 1 300 g) programmé pour enregistrer une position télémétrique toutes les deux heures et demie. Les faons et quelques adultes ont été équipés d'un collier de type VHF (*very high frequency*; modèle LMRT-3 de Lotek Engineering Inc., Newmarket, ON, Canada; 400 g) pour faciliter leur recapture l'hiver suivant, moment où ils étaient munis d'un collier GPS. Tous les colliers étaient équipés d'un dispositif causant l'accélération de la fréquence d'émission VHF après quatre heures d'immobilité totale, pour permettre le

repérage des animaux morts. L'âge de l'animal était évalué à partir de la taille corporelle pour les juvéniles et par l'examen visuel de l'usure des dents pour les adultes (Hewison et collab., 1999). Une fois l'opération de marquage terminée (environ 15 minutes), l'animal était immédiatement relâché.

Nous avons effectué trois survols en avion par année, soit à la fin de février, à la mi-juin et à la fin d'octobre, pour vérifier le fonctionnement des colliers et faire le relevé des individus morts, en prenant soin, si possible, de noter la cause de la mortalité. À la fin de mars 2012, tous les colliers sont tombés au sol grâce à un dispositif de chute automatique programmé pour libérer l'animal de son collier sans intervention humaine. La récupération des colliers a eu lieu en mars et en avril 2012. Le tableau 1 montre le nombre d'individus suivis par année dans le cadre du projet, et les tableaux 2 à 6 montrent les bilans des séances de capture effectuées de 2007 à 2011.

Tableau 1. Nombre de caribous forestiers de Charlevoix suivis par télémétrie GPS ou VHF de 2004 à 2011, dans le cadre du projet de recherche sur les impacts de la réfection de la route 175 (2007-2011) ainsi que d'un projet antérieur (2004-2006).

Année	GPS			VHF
	Nombre d'individus suivis	Nombre d'individus femelles – mâles	Nombre de localisations télémétriques obtenues	
2004	17	17 – 0	18 752	0
2005	18	18 – 0	24 970	0
2006	18	18 – 0	26 207	3
2007	26	20 – 6	53 434	8
2008	30	20 – 10	85 354	10
2009	35	24 – 11	86 674	0
2010	32	22 – 10	88 421	0
2011	21	16 – 5	66 904	0
TOTAL	59	42 – 17	463 601	21

Tableau 2. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2007.

Catégorie d'âge	Identifiant	Date de capture (année-mois-jour)	Sexe	Type de collier
Adultes	GJ21	2007-02-17	F	GPS
	GJ50	2007-02-18	F	GPS
	GJ52	2007-03-01	F	GPS
	GJ53	2007-03-09	F	GPS
	GJ55	2007-02-17	F	GPS
	GJ56	2007-07-04	M	GPS
	GJ57	2007-02-18	F	GPS
	GJ59	2007-04-07	F	GPS
	GJ63	2007-03-01	F	VHF
	GJ66	2007-03-09	F	GPS
	GJ67	2007-03-09	F	VHF
	GJ68	2007-03-01	F	VHF
	GJ69	2007-04-07	F	GPS
	GJ70	2007-03-01	F	GPS
	GJ71	2007-03-09	F	VHF
	GJ72	2007-02-17	F	GPS
	GJ73	2007-02-18	F	GPS
	GJ74	2007-03-09	F	VHF
	GJ75	2007-03-09	M	GPS
GJ76	2007-06-28	M	GPS	
GJ77	2007-06-28	M	GPS	
Juvéniles	GJ07-516	2007-03-31	M	GPS
	GJ52-601	2007-03-01	F	VHF
	GJ53-501	2007-06-28	M	GPS
	GJ59-506	2007-04-07	F	GPS
	GJ70-605	2007-02-17	M	VHF
	GJ73-521	2007-03-31	F	GPS
	GJ73-618	2007-02-18	F	VHF

Tableau 3. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2008.

Catégorie d'âge	Identifiant	Date de capture (année-mois-jour)	Sexe	Type de collier
Adultes	GJ07	2008-03-29	F	GPS
	GJ71	2008-03-29	F	GPS
	GJ78	2008-03-29	M	GPS
	GJ79	2008-04-08	F	GPS
	GJ80	2008-03-30	M	GPS
	GJ81	2008-03-30	F	GPS
	GJ82	2008-03-30	M	GPS
	GJ83	2008-03-30	M	GPS
Juvéniles	GJ21-502	2008-03-28	F	GPS
	GJ69-520	2008-03-30	F	GPS
	GJ07-709	2008-03-29	F	VHF
	GJ502-710	2008-03-29	F	VHF
	GJ21-702	2008-03-28	M	VHF
	GJ24-706	2008-03-29	F	VHF
	GJ50-708	2008-03-29	F	VHF
	GJ52-704	2008-03-29	M	VHF
	GJ71-701	2008-03-30	M	VHF
	GJ73-713	2008-03-29	F	VHF
	GJ79-714	2008-03-29	F	VHF
	GJ81-714	2008-03-30	F	VHF

Tableau 4. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2009.

Catégorie d'âge	Identifiant	Date de capture (année-mois-jour)	Sexe	Type de collier
Adultes	GJ21	2009-01-20	F	GPS
	GJ50	2009-03-17	F	GPS
	GJ52	2009-01-22	F	GPS
	GJ53	2009-03-17	F	GPS
	GJ55	2009-03-18	F	GPS
	GJ57	2009-01-23	F	GPS
	GJ59	2009-03-19	F	GPS
	GJ66	2009-01-20	F	GPS
	GJ67	2009-01-22	F	GPS
	GJ69	2009-03-16	F	GPS
	GJ70	2009-03-19	F	GPS
	GJ72	2009-01-20	F	GPS
	GJ73	2009-03-17	F	GPS
	GJ76	2009-01-19	M	GPS
	GJ77	2009-03-16	M	GPS
Juvéniles	GJ07-516	2009-01-21	M	GPS
	GJ07-709	2009-03-19	F	GPS
	GJ502-710	2009-03-17	F	GPS
	GJ50-708	2009-01-22	F	GPS
	GJ52-601	2009-03-17	F	GPS
	GJ52-704	2009-01-20	M	GPS
	GJ53-501	2009-01-21	M	GPS
	GJ70-605	2009-03-19	M	GPS
	GJ71-701	2009-03-18	M	GPS
	GJ73-521	2009-03-17	F	GPS
	GJ81-714	2009-03-18	F	GPS

Tableau 5. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2010.

Catégorie d'âge	Identifiant	Date de capture (année-mois-jour)	Sexe	Type de collier
Adultes	GJ79	2010-01-07	F	GPS
	GJ82	2010-01-07	M	GPS
	GJ84	2010-03-06	M	GPS
	GJ85	2010-03-06	F	GPS
	GJ86	2010-03-06	M	GPS
	GJ87	2010-03-07	M	GPS
	GJ88	2010-03-07	F	GPS
	GJ89	2010-03-07	F	GPS
	GJ90	2010-03-09	F	GPS
	GJ91	2010-03-09	F	GPS
	GJ92	2010-03-09	F	GPS
Juvéniles	GJ21-502	2010-01-06	F	GPS
	GJ21-702	2010-01-05	M	GPS
	GJ79-714	2010-03-06	F	GPS

Tableau 6. Bilan de la séance de capture de l'hiver 2011.

Catégorie d'âge	Identifiant	Date de capture (année-mois-jour)	Sexe	Type de collier
Adultes	GJ50	2011-01-13	F	GPS
	GJ52	2011-01-14	F	GPS
	GJ55	2011-01-17	F	GPS
	GJ66	2011-01-17	F	GPS
	GJ67	2011-01-13	F	GPS
	GJ70	2011-01-17	F	GPS
	GJ72	2011-01-14	F	GPS
	GJ73	2011-01-14	F	GPS
	GJ76	2011-01-14	M	GPS
	GJ92	2011-01-17	F	GPS
Juvéniles	GJ07-516	2011-01-14	M	GPS
	GJ07-709	2011-01-17	F	GPS
	GJ50-708	2011-01-13	F	GPS
	GJ52-601	2011-01-13	F	GPS
	GJ81-714	2011-01-13	F	GPS

Afin de bien évaluer les impacts du projet de réfection de la route 175 sur le caribou forestier, nous souhaitons comparer le comportement des mêmes individus avant, pendant et après la réfection. Le tableau 7, qui montre la durée du suivi télémétrique pour chaque individu équipé d'un collier GPS au cours de l'étude, permet de constater que nous avons atteint cet objectif. Ainsi, les caribous forestiers ont été suivis pendant plus de trois ans en moyenne, et quatre individus ont été suivis en continu pendant huit ans (en incluant les données de 2004 à 2006). Cette longue série temporelle de données télémétriques a permis d'explorer plusieurs facettes de l'écologie des caribous forestiers.

Le nombre d'individus suivis par télémétrie GPS était en moyenne de 25 par année, avec un maximum de 35 individus en 2009. Il s'agit d'un échantillon fort représentatif de la

population, qui comptait de 70 à 80 individus au cours de l'étude (St-Laurent et Dussault, 2012). Nous avons cumulé des données sur 42 mâles-années. Plusieurs individus juvéniles ont été munis d'un collier GPS vers l'âge de 22 mois. Ces juvéniles étaient tous les descendants d'une femelle adulte suivie par télémétrie (le nombre précédant le tiret dans l'identifiant des juvéniles correspond à l'identifiant de leur mère). Le nombre d'individus suivis a diminué en 2011 parce que plusieurs individus sont morts par prédation.

Tableau 7. Liste des caribous forestiers de Charlevoix suivis par télémétrie GPS dans le cadre du projet de recherche sur les impacts de la réfection de la route 175. Une case de couleur indique que l'animal était suivi durant l'année en question. La couleur rouge indique que l'individu est mort en cours d'année.

Catégorie d'âge	Identifiant	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Adultes	GJ50								
	GJ52								
	GJ55								
	GJ66								
	GJ67								
	GJ53								
	GJ59								
	GJ57								
	GJ62								
	GJ63								
	GJ68								
	GJ64								
	GJ54								
	GJ65								
	GJ51								
	GJ58								
	GJ61								
	GJ70								
	GJ72								
	GJ69								
	GJ71								
	GJ73								
	GJ74								
	GJ76								
	GJ21								
	GJ77								
GJ75									

Catégorie d'âge	Identifiant	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Adultes (suite)	GJ56				■	■			
	GJ79					■	■		
	GJ82					■	■	■	
	GJ07					■	■		
	GJ78					■	■		
	GJ80					■	■		
	GJ81					■	■		
	GJ83					■			
Juvéniles	GJ85							■	■
	GJ92							■	■
	GJ84							■	■
	GJ91							■	■
	GJ86							■	
	GJ87							■	
	GJ88							■	
	GJ89							■	
	GJ90							■	
	GJ07-516				■	■	■	■	■
	GJ53-501				■	■	■	■	■
	GJ59-506				■	■	■		
	GJ73-521				■	■	■		
	GJ21-502					■	■	■	■
	GJ69-520					■	■		
	GJ07-709						■	■	■
	GJ50-708						■	■	■
	GJ52-601						■	■	■
	GJ70-605						■	■	■
	GJ81-714						■	■	■
GJ52-704						■			
GJ71-701						■			
GJ21-702							■		
GJ79-714							■		

3. Caractérisation de l'habitat du caribou forestier

Les 59 caribous forestiers équipés d'un collier GPS entre 2004 et 2011 ont utilisé une aire de répartition de plus de 7 240 km², ce qui constitue notre aire d'étude (voir la figure 2). Toutes les localisations télémétriques ont été projetées dans un système d'information géographique (logiciel ArcGIS 9.3, ESRI Inc., Redlands, CA, É.-U.), où nous avons pu leur associer une foule d'informations provenant de diverses cartes d'habitat. Nous avons utilisé les cartes écoforestières fournies par le MRNF pour déterminer les types d'habitat disponibles dans l'aire d'étude, que nous avons regroupés en neuf classes en nous basant sur le couvert végétal dominant, la hauteur et l'âge des arbres ainsi que leur importance pour le caribou forestier (tableau 8). Les cartes écoforestières ont été mises à jour annuellement afin d'inclure les nouvelles coupes forestières et les nouveaux chemins forestiers. Nous avons utilisé des modèles numériques d'élévation pour caractériser la topographie. Enfin, nous avons utilisé des photos aériennes de la route 175 fournies par le MTQ pour déterminer le tracé de la route 175 avant et après sa réfection.

Pour obtenir la meilleure évaluation possible des impacts du réseau routier sur le caribou forestier de Charlevoix, nous avons distingué les routes « actives » (routes asphaltées, y compris la route 175, et chemins forestiers de premier ordre) des chemins peu fréquentés (chemins forestiers de deuxième et de troisième ordre; Desautels et collab., 2009). Les routes actives ont une emprise de 35 à 90 m et sont fréquemment entretenues en hiver. Leur durée de vie est d'au moins 10 ans (beaucoup plus pour les routes asphaltées). La densité de routes actives dans l'aire d'étude était de 0,19 km/km² et la distance moyenne des localisations de caribous forestiers à celles-ci était de $2,2 \pm 1,4$ km. Les chemins peu fréquentés (ci-après nommés chemins forestiers) ont une largeur de 15 à 30 m et une durée de vie de moins de 10 ans (Desautels et collab., 2009). Ces chemins ne sont pas entretenus par les compagnies forestières, mais demeurent généralement praticables plusieurs années après leur construction en raison de leur utilisation par les chasseurs, les pêcheurs et les récréotouristes. La densité de chemins forestiers était de 1,47 km/km² et la distance moyenne des localisations de caribous forestiers à ces chemins était de $0,8 \pm 0,7$ km.

Tableau 8. Classes d'habitat utilisées pour étudier la sélection d'habitat du caribou forestier de Charlevoix et proportion des localisations télémétriques (2004-2006) qui se trouvaient dans chaque classe.

Classe d'habitat	Localisations (%)
Conifères matures 50-70 ans	23,9
Conifères matures \geq 90 ans	19,2
Perturbations récentes (\leq 5 ans), y compris les coupes et les perturbations naturelles	18,8
Perturbations anciennes (6-20 ans), y compris les coupes et les perturbations naturelles	11,2
Milieus ouverts riches en lichen	10,6
Milieus en régénération ($>$ 20 ans)	4,7
Milieus humides	4,1
Décidus matures	2,5
Autres : eau, infrastructures humaines, lignes de transport d'énergie, etc.	5,0

4. Réfection de la route 175 et design expérimental

Les travaux de réfection de la route 175 se sont déroulés progressivement, sur différents chantiers de construction d'une longueur moyenne de 7 km. Les premiers travaux ont débuté en mai 2006 et les derniers, en juin 2009. Sur chaque chantier, les travaux ont duré entre 100 et 900 jours, et se déroulaient en continu, le jour comme la nuit (sauf lors des vacances de la construction ou d'intempéries majeures). Le tableau 9 présente la longueur de la route 175 incluse dans l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix, par année et par statut de réfection (avant, pendant ou après la réfection). Au cours d'une même année, un individu pouvait interagir avec des sections de route dont le statut de réfection était différent. Cela veut dire que les individus pouvaient faire face à des segments de route dont le niveau de dérangement associé aux activités humaines variait en fonction de la largeur de l'emprise routière, de la présence de chantiers de construction et de la densité de trafic.

Nous avons pu profiter de cette variabilité spatiotemporelle de l'intensité des activités humaines pour étudier la réponse du caribou forestier face au dérangement. Les réactions des caribous forestiers ont été étudiées grâce à plusieurs aspects de leur comportement : répartition spatiale, utilisation des milieux en périphérie de la route, déplacements, taux de traversées de la route et sélection d'habitat multiéchelle. Ainsi, de façon générale, la « situation initiale » ou période « avant la réfection » fait référence aux données collectées de 2004 à 2006 avant le début des travaux de réfection, alors que les périodes « pendant la réfection » (en chantier) et « après la réfection » font référence aux données recueillies de 2007 à 2011. Toutefois, plusieurs analyses nécessitaient une estimation précise de l'état d'avancement des travaux de chaque segment de route. Nous avons donc mis à jour le statut de réfection de chaque segment de 1 km de la route 175 tous les 15 jours, en nous basant sur les cahiers des surveillants en environnement responsables des chantiers (données fournies par le MTQ). Ainsi, nous avons pu attribuer à chaque segment de 1 km de route un état d'avancement des travaux.

Tableau 9. Longueur de la route 175 traversant l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix, par année et par statut de réfection. Les chantiers de réfection ont débuté au plus tôt en 2006 et se sont terminés au plus tard en 2010.

Année	Longueur de la route 175 dans l'aire de répartition du caribou forestier (km)		
	Avant la réfection	Pendant la réfection	Après la réfection
2004	95,5	0,0	0,0
2005	95,5	0,0	0,0
2006	80,4	15,1	0,0
2007	80,4	15,1	0,0
2008	23,2	61,7	10,6
2009	0,0	80,4	15,1
2010	0,0	36,6	58,9
2011	0,0	0,0	95,5

La plupart des analyses réalisées dans cette étude portaient sur l'ensemble des individus suivis par télémétrie GPS. Toutefois, certaines analyses avaient pour objectif de déterminer la réaction comportementale des seuls caribous forestiers à proximité de la route 175. Nous avons donc limité certaines analyses à des zones de différentes largeurs de part et d'autre de la route 175. Ces zones, correspondant à des zones d'effet (Forman, 2000) ou zones d'influence autour de la route, avaient des largeurs de 1 250 m, 2 500 m et 5 000 m. Nous avons aussi créé des zones plus larges que 5 000 m, mais les analyses ont révélé des résultats semblables à ceux obtenus avec l'ensemble des localisations. La figure 3 présente un schéma des trois zones d'effet utilisées au cours de cette étude.

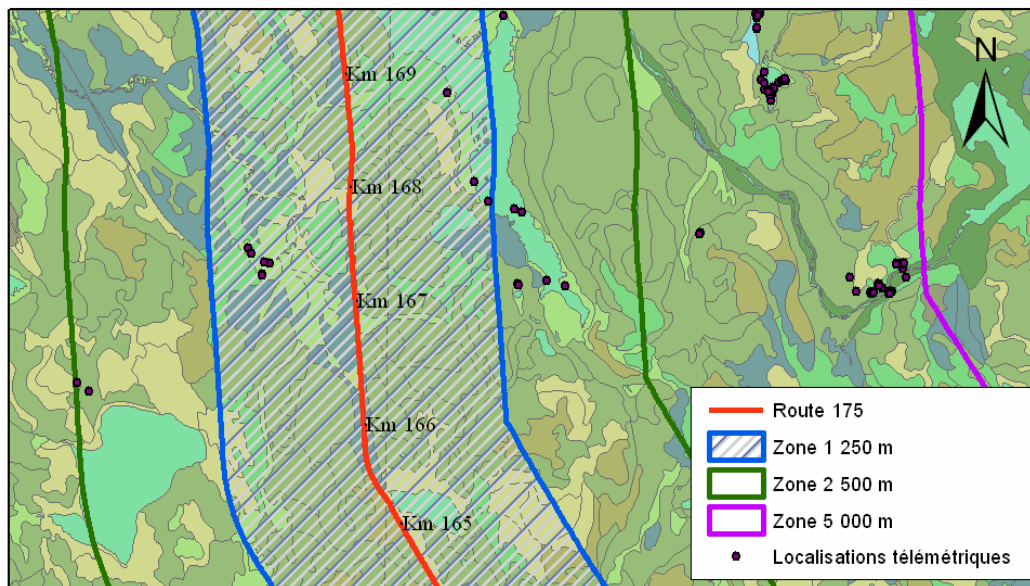


Figure 3. Représentation des zones de 1 250 m (ici en hachuré), 2 500 m et 5 000 m de part et d'autre de la route 175 utilisées dans certaines analyses pour caractériser les impacts de la route sur le comportement du caribou forestier de Charlevoix.

5. Utilisation de l'espace par le caribou forestier

5.1 Superficie des domaines vitaux annuels

À l'aide de la technique du polygone convexe minimum (Mohr, 1947), nous avons élaboré 197 domaines vitaux annuels en traçant un polygone englobant toutes les localisations de chaque individu chaque année. Les caribous forestiers ont utilisé des domaines vitaux annuels ayant une superficie de 491 km² en moyenne. Les femelles caribous forestiers ($n = 42$ femelles et 155 femelles-années, 515 km²) ont utilisé des domaines vitaux annuels plus grands que les mâles ($n = 17$ mâles et 42 mâles-années, 404 km²; $F = 2,65$; $dl = 44$; $P < 0,001$). Les caribous forestiers utilisent donc de très grands domaines vitaux, ce qui augmente la probabilité qu'ils entrent en contact avec le réseau routier. En comparaison, les orignaux (*Alces alces*) du même secteur utilisaient des domaines vitaux annuels de 54 km² (Laurian et collab., 2008).

Les domaines vitaux annuels étaient plus grands avant (2004-2006, $n = 53$ individus-années, 619 km²) que pendant et après la réfection de la route 175 (2007-2011, $n = 144$ individus-années, 445 km²; $F = 2,81$; $dl = 52$; $p < 0,001$). Si on considère seulement les individus dont le domaine vital annuel incluait la route 175, cette différence de superficie des domaines vitaux associée aux deux périodes disparaît ($F = 1,95$; $dl = 14$; $p = 0,185$). Cependant, tout au long des deux périodes, le nombre d'individus qui ont utilisé la route 175 était faible : seulement 15 individus-années de 2004 à 2006 (1 358 km²) et 19 individus-années de 2007 à 2011 (1 035 km²).

Outre l'abondance des perturbations anthropiques incluses dans le domaine vital des individus, la superficie du domaine vital dépend aussi de plusieurs autres facteurs, tels que le sexe et l'âge de l'individu, la disponibilité et la qualité des ressources alimentaires et les variations climatiques (Anderson et collab., 2005). C'est pourquoi la superficie du domaine vital annuel n'est pas le meilleur indicateur pour évaluer les impacts d'une route sur les caribous forestiers. Nous avons donc porté davantage attention à d'autres facettes de leur comportement.

5.2 Localisation des domaines vitaux annuels

Seulement 34 des 197 domaines vitaux annuels (17 %) incluaient la route 175 (tableau 10). Ces domaines vitaux annuels appartenait à 13 individus et étaient répartis sur les huit années de suivi. Grâce au suivi télémétrique, nous avons pu vérifier que ces individus avaient bel et bien traversé la route 175 au moins une fois dans l'année. De plus, le domaine vital annuel de 13 individus-années était situé relativement près de la route 175 (< 1 250 m), sans toutefois l'inclure. Ces individus ont peut-être réagi à la présence de la route 175 et ne s'en sont pas approchés ni ne l'ont traversée. La plupart des individus sont demeurés exclusivement du côté est de la route 175 (tableau 10). Ces observations indiquent que plusieurs caribous forestiers ont évité la route 175 à l'échelle du paysage et qu'ils ont préféré établir leur domaine vital loin de celle-ci. Cela signifie également que le dérangement associé à la route 175 influait déjà sur la répartition des caribous forestiers de Charlevoix avant sa réfection.

Des 34 domaines vitaux annuels incluant la route, 15 ont été établis avant la réfection et 19 ont été établis pendant et après la réfection. Afin de déterminer si les travaux avaient pu causer un déplacement du domaine vital annuel des individus en périphérie de la route, nous avons évalué si la densité de la route 175 (km/km^2) dans le domaine vital annuel des caribous forestiers diminuait au fil des ans. En effectuant une corrélation de Spearman entre la densité de la route 175 dans le domaine vital des individus et l'année, nous avons obtenu une corrélation négative (r de Spearman = $-0,167$, $P = 0,029$). Ainsi, les caribous forestiers incluaient de moins en moins la route 175 dans leur domaine vital annuel à mesure que le projet de réfection avançait. De plus, nous avons observé que huit des neuf individus ayant un domaine vital annuel qui incluait la route 175 avant le début des travaux, et qui ont été suivis par télémétrie pendant plus de deux ans, ont modifié leur utilisation de l'espace afin d'exclure la route 175 de leur domaine vital annuel pendant ($n = 3$) ou après les travaux ($n = 5$).

Tableau 10. Localisation des domaines vitaux annuels des caribous forestiers de Charlevoix par rapport à la route 175, en nombre d'individus-années, de 2004 à 2011.

Localisation du domaine vital annuel par rapport à la route 175			
(en nombre d'individus-années)			
Année	Inclut la route	À l'est de la route	À l'ouest de la route
2004	4	13	0
2005	6	10	2
2006	5	12	1
2007	4	19	3
2008	6	21	3
2009	2	25	7
2010	5	24	3
2011	2	17	3
Total	34	141	22

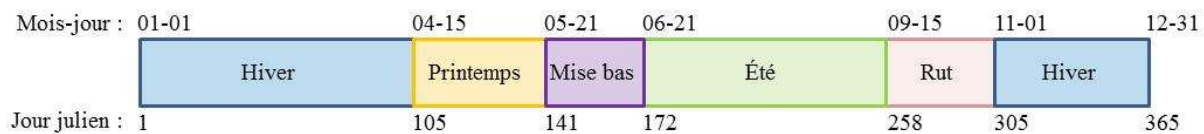


Figure 4. Dates de début et de fin des saisons utilisées pour décrire le comportement des caribous forestiers de Charlevoix.

5.3 Superficie des domaines vitaux saisonniers

Nous avons délimité les domaines vitaux saisonniers des individus en utilisant six saisons basées sur le cycle vital annuel du caribou forestier (Courtois, 2003; voir la figure 4). Les domaines vitaux saisonniers avaient une superficie moyenne de 208 km² en hiver ($n = 197$), de 124 km² au printemps ($n = 171$), de 66 km² durant la mise bas ($n = 170$), de 106 km² en été ($n = 173$) et de 141 km² durant le rut ($n = 163$). La vaste superficie des domaines vitaux hivernaux peut s'expliquer par le fait que certains caribous forestiers ont

effectué des déplacements de grande amplitude pendant l'hiver, ou juste avant le printemps (voir la section 5.4). La superficie des domaines vitaux au printemps et pendant le rut était également grande. Ce sont des périodes durant lesquelles les déplacements chez le caribou forestier ont une signification écologique particulière. En effet, c'est à ces moments de l'année qu'ils effectuent la dispersion printanière et qu'ils recherchent des partenaires sexuels, respectivement. C'est durant la mise bas que la superficie du domaine vital était la plus petite, puisque les femelles demeurent généralement de deux à trois semaines dans un environnement très restreint après la naissance de leur veau (Gustine et collab., 2006).

5.4 Déplacements des caribous forestiers dans l'aire d'étude

La distribution spatiale du caribou forestier de Charlevoix a beaucoup changé au cours des dernières décennies. Autrefois concentrée à l'intérieur des limites du parc national des Grands-Jardins, cette population occupe maintenant une aire beaucoup plus vaste (voir la figure 2). La télémétrie GPS nous a permis de déterminer quelles étaient les régions les plus utilisées par le caribou forestier, ainsi que les principaux déplacements à grande échelle réalisés par les individus.

Nous avons pu remarquer que la plupart des caribous forestiers fréquentaient des secteurs différents l'hiver et l'été. Ces secteurs étaient situés en moyenne à plus de 15 km l'un de l'autre. De façon générale, les caribous forestiers semblaient effectuer trois déplacements à grande échelle au cours de l'année. Ainsi, 78 % des caribous forestiers ont effectué un premier déplacement important durant l'hiver (période du 1^{er} janvier au 14 avril), et 79 % ont procédé à une dispersion printanière. L'utilisation du site d'hivernage historique du parc des Grands-Jardins et la dispersion vers le sud-ouest au printemps étaient des comportements présents chez plusieurs individus. Nous avons toutefois observé une grande variabilité interindividuelle dans le choix des sites d'hivernage et dans les stratégies de dispersion. Par exemple, certains caribous forestiers semblaient se déplacer en hiver plutôt qu'au printemps, parcouraient des distances variables, se rendaient dans des sites différents chaque année, ou bien semblaient plutôt sédentaires toute l'année. La figure 5 montre le patron général des principales aires utilisées par le caribou forestier de

Charlevoix au cours de l'étude, ainsi que les déplacements les plus communs à l'échelle de la population.

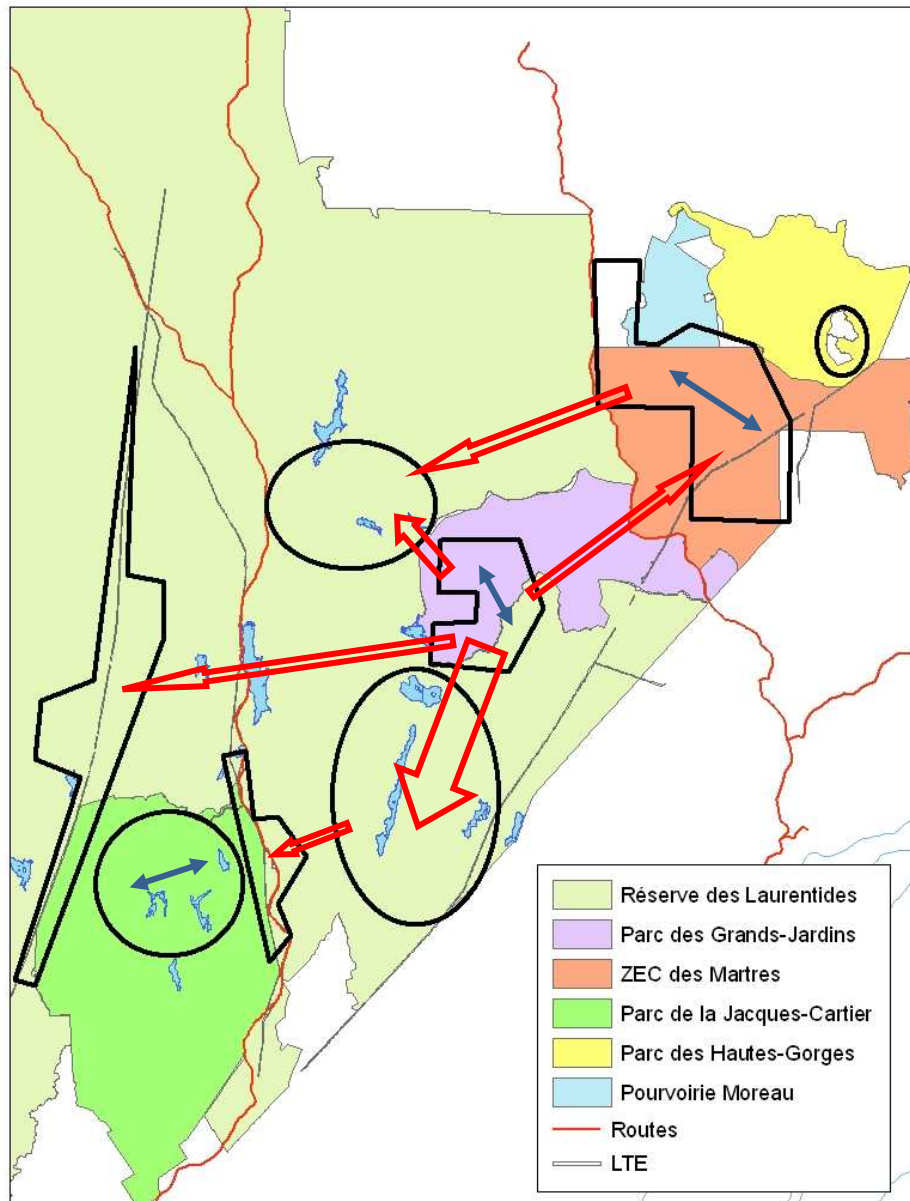


Figure 5. Patron général des principaux sites utilisés et des déplacements des caribous forestiers de Charlevoix, de 2004 à 2011. Les flèches rouges représentent les principaux déplacements effectués à la fin de l'hiver et au printemps. Ces déplacements sont généralement suivis plus tard dans l'année d'un retour vers les sites d'hivernage. Les flèches bleues représentent les principaux déplacements effectués en hiver. La largeur des flèches représente l'importance relative de ces mouvements parmi les individus de la population. LTE = emprise des lignes de transport d'énergie.

6. Traversées de la route 175 par le caribou forestier

Seulement 13 (5 mâles et 8 femelles) des 59 caribous forestiers suivis (22 %) ont traversé la route 175 au moins une fois entre 2004 et 2012, pour un total de 105 traversées (tableau 11). Moins de 0,03 % des pas effectués par le caribou forestier (le pas représente le déplacement de l'animal entre deux localisations télémétriques) impliquaient une traversée de la route. La route 175 a été traversée en moyenne 12,6 fois par année par les caribous forestiers porteurs d'un collier GPS. La majorité des traversées de la route 175 ont été effectuées par quelques individus seulement. Ainsi, 5 individus ont traversé la route 175 plus de 10 fois chacun au cours de l'étude. Par exemple, les individus GJ66 et GJ55 ont respectivement traversé la route 18 et 17 fois. Fait intéressant, l'individu GJ55 a fortement utilisé l'emprise d'une ligne de transport d'énergie dans un secteur où cette ligne longe et traverse la route 175 (bornes kilométriques 115 à 125, voir la figure 7). L'individu GJ66 n'a pas suivi les lignes de transport d'énergie, mais a tout de même traversé la route 175 de deux à quatre fois par année durant sept années consécutives. Il semble donc que l'utilisation de l'emprise des lignes de transport d'énergie explique seulement en partie les traversées de la route 175 par certains individus. À titre comparatif, signalons que le taux de traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix (0,5 traversée par individu par année) était inférieur au taux de traversées observé chez l'original dans la même région (4,6 traversées par individu par année; Laurian et Collab., 2008).

6.1 Répartition spatiale des traversées de la route 175

La figure 6 montre l'emplacement estimé de l'ensemble des traversées de la route 175 effectuées par les caribous forestiers entre 2004 et 2012. Plusieurs traversées étaient localisées entre les kilomètres 115 et 125 de la route 175. D'ailleurs, la figure 7 montre plus en détail l'emplacement des traversées dans ce secteur. Le secteur situé entre les bornes kilométriques 115 et 125 a été traversé 61 fois, ce qui représente 58 % des traversées totales, et le secteur situé entre les bornes kilométriques 119 à 121 a été traversé 30 fois. Ce secteur est caractérisé par la présence d'une ligne de transport d'énergie qui traverse et longe la route 175. Or, l'emprise de cette ligne de transport

d'énergie est fortement utilisée par quelques individus. L'emprise des lignes de transport d'énergie présentes dans la réserve faunique des Laurentides fut utilisée par 10 individus différents, mais seulement quatre d'entre eux l'utilisaient de façon substantielle.

Bien que la route 175 soit évitée à l'échelle populationnelle, il est important de maintenir la connectivité entre ses deux côtés dans les secteurs sélectionnés par le caribou forestier. Ainsi, le secteur situé entre les kilomètres 115 et 125, et plus précisément entre les kilomètres 119 et 121, permet la majorité des échanges d'individus de part et d'autre de la route 175. Ce secteur assure donc les échanges entre les côtés est et ouest de l'aire de répartition du caribou forestier, ce qui favorise l'accessibilité aux ressources et aux partenaires sexuels, et ultimement améliore les échanges génétiques. Ce serait sans aucun doute le secteur le plus approprié pour mettre en place une structure permettant la traversée de la route 175 par les caribous forestiers. Cette structure assurerait non seulement la sécurité des caribous forestiers qui y traversent, mais aussi celle des usagers de la route. Une éventuelle interruption des traversées de la route 175 par le caribou forestier entraînerait la subdivision de la population en deux sous-groupes, chacun ayant une probabilité plus élevée d'extinction attribuable à des événements stochastiques (Foley, 1994).

Tableau 11. Nombre de traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2012 et nombre d'individus ayant fait ces traversées.

Année	Nombre de traversées de la route 175	Nombre d'individus ayant traversé
2004	13	4
2005	20	5
2006	6	3
2007	14	4
2008	21	5
2009	6	2
2010	17	4
2011	4	2
2012 ^a	4	2
Total	105	13

^a De janvier à avril 2012 seulement.

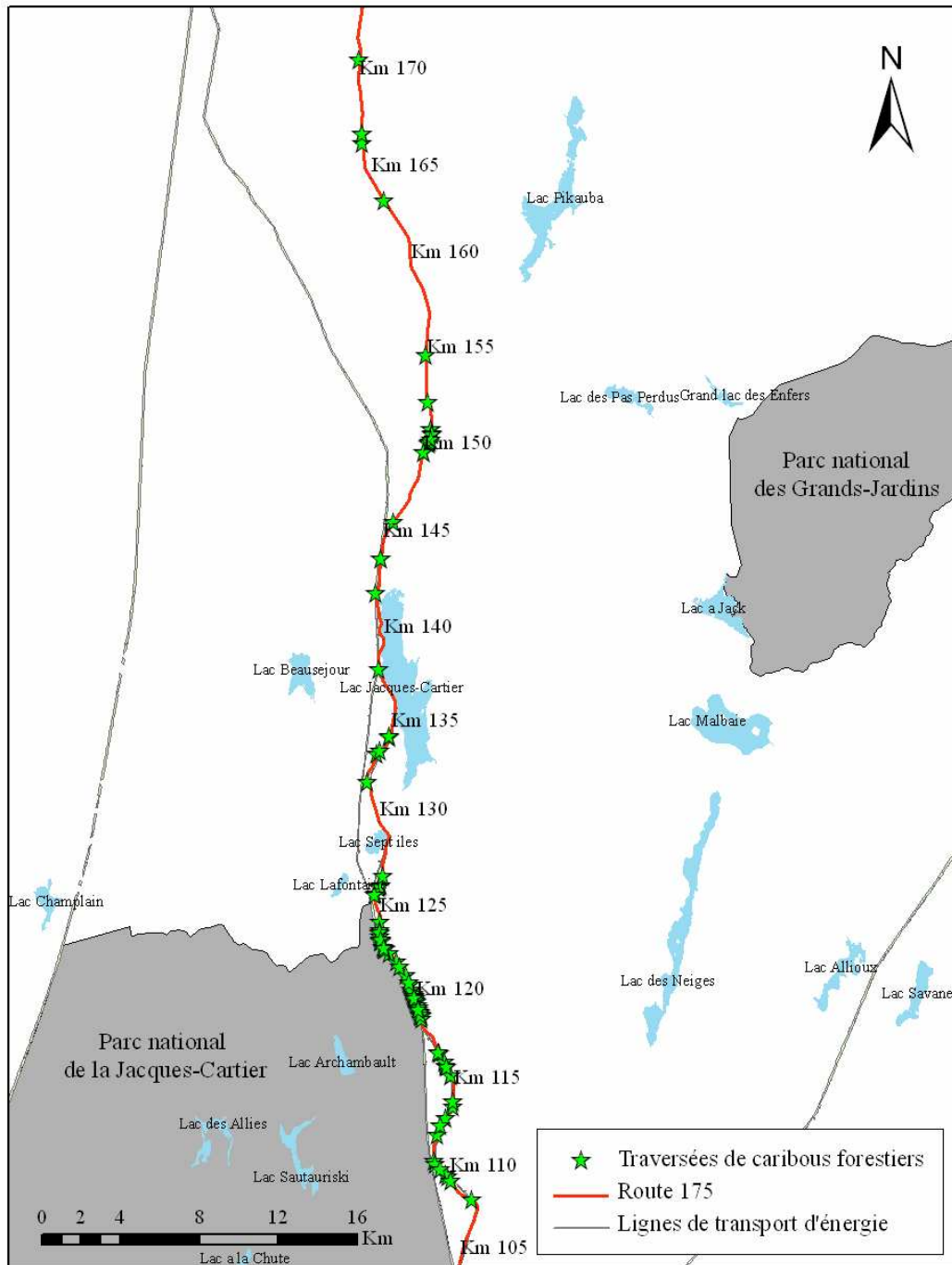


Figure 6. Carte présentant la localisation de l'ensemble des traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2012 ($n = 105$ traversées).

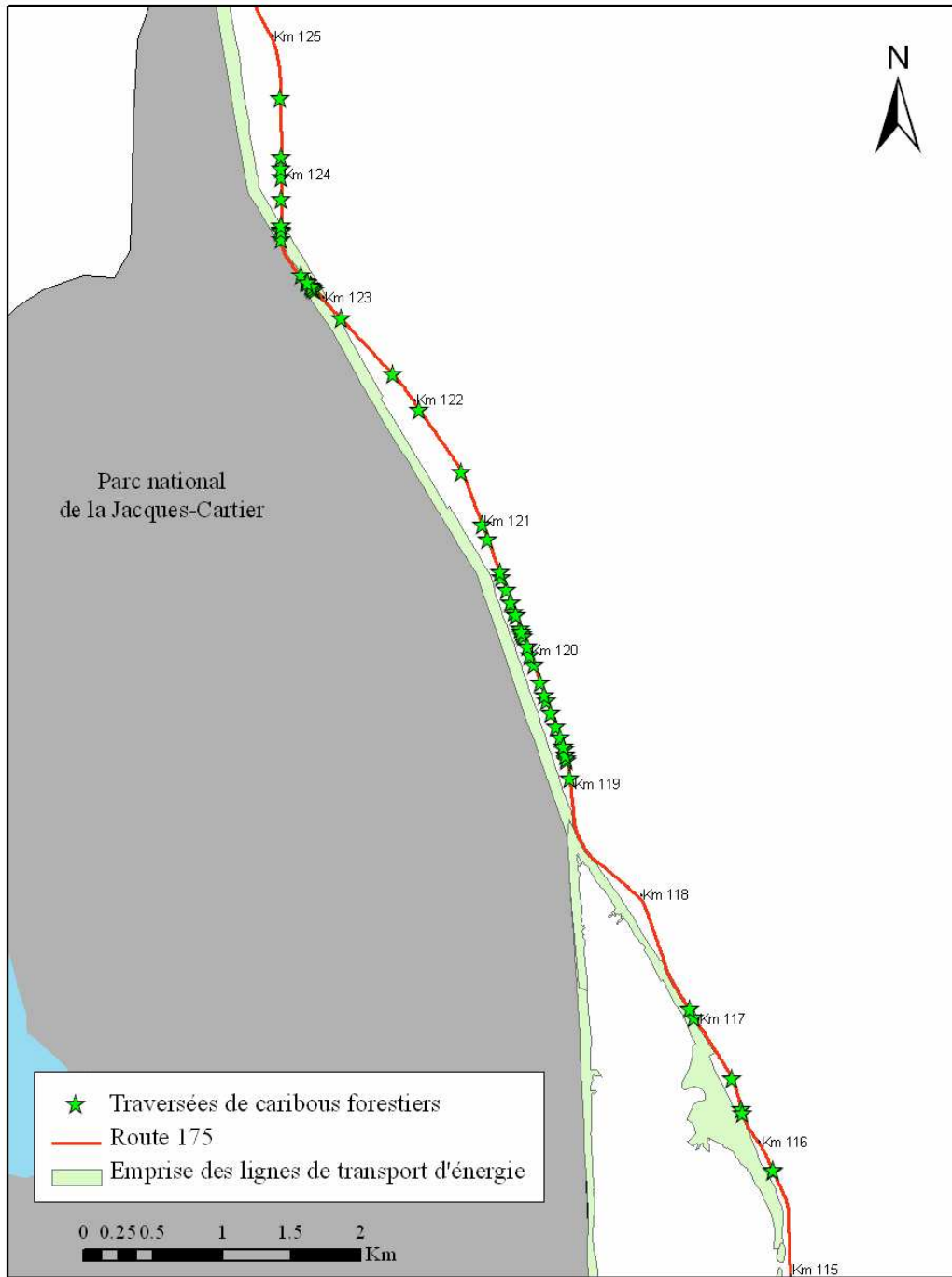


Figure 7. Carte présentant la localisation des traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2012 entre les bornes kilométriques 115 et 125 ($n = 61$ traversées).

6.2 Répartition temporelle des traversées de la route 175

La majorité (79 %) des traversées de la route 175 ont eu lieu entre la mi-avril et la mi-juin, alors que les caribous forestiers effectuent leur dispersion printanière et qu'ils recherchent un site propice à la mise bas (tableau 12). Sur les 105 traversées, seulement 6 ont eu lieu durant l'hiver, 8 durant l'été et 8 durant le rut. Les traversées de la route 175 n'étaient pas plus fréquentes durant un jour de la semaine en particulier (figure 8). Enfin, les traversées de la route 175 survenaient généralement au milieu de la journée, entre 7 h et 17 h (figure 9), au moment où la densité de trafic était la plus élevée (voir la section 7, qui traite de l'effet du trafic sur le comportement du caribou forestier).

Tableau 12. Répartition temporelle des traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix de 2004 à 2012, selon la saison ($n = 105$ traversées). Voir la figure 4 pour connaître la définition de chaque saison.

Année	Hiver	Printemps	Mise bas	Été	Rut
2004	2	5	3	3	0
2005	0	1	14	2	3
2006	0	4	1	1	0
2007	0	1	10	1	2
2008	4	9	8	0	0
2009	0	0	5	0	1
2010	0	4	11	1	1
2011	0	0	3	0	1
2012 ^a	0	4	–	–	–
Total	6	28	55	8	8

^a De janvier à avril 2012 seulement.

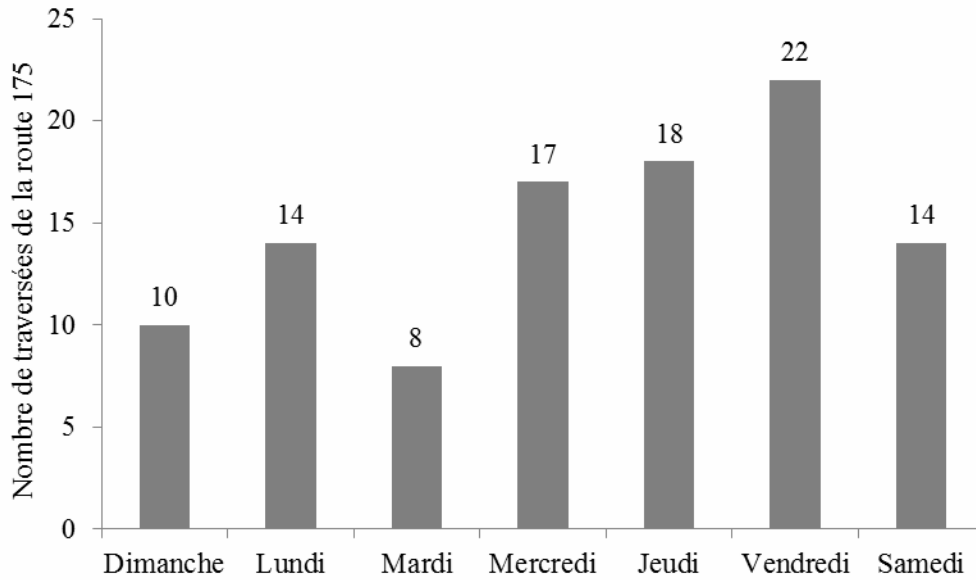


Figure 8. Répartition des traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix de 2004 à 2012, selon le jour de la semaine ($n = 105$ traversées).

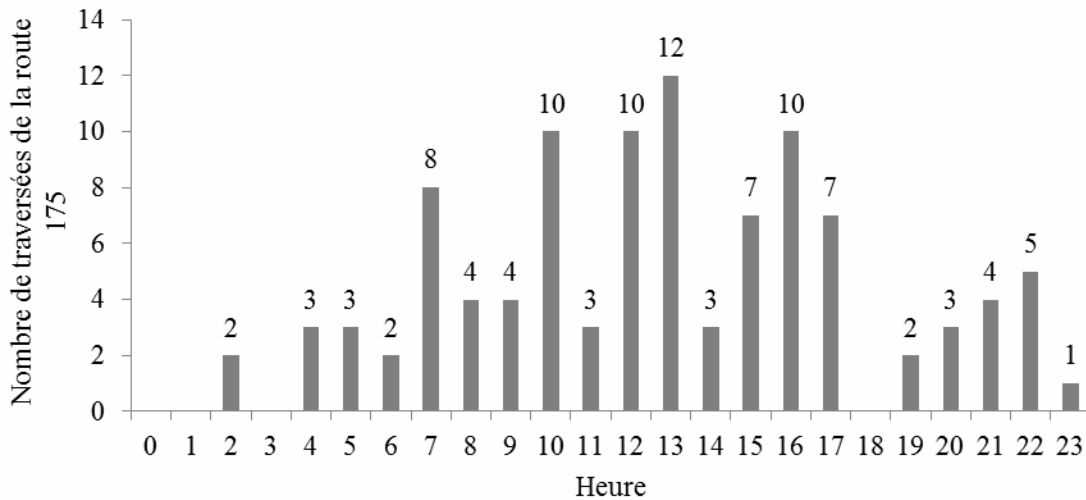


Figure 9. Répartition des traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix de 2004 à 2012, selon l'heure de la journée ($n = 105$ traversées).

6.3 Impacts de la route 175 sur les déplacements du caribou forestier

Pour déterminer si la route 175 avait des impacts sur les déplacements du caribou forestier de Charlevoix, nous avons réalisé une analyse permettant de comparer le

nombre de traversées de la route 175 effectuées par les caribous forestiers avec celui obtenu au moyen d'un modèle de déplacement aléatoire. Pour ce faire, nous avons simulé 1 000 routes virtuelles dans un système d'information géographique. Ces routes virtuelles possédaient le même tracé que la route 175, mais nous les avons déplacées (translation et rotation) afin qu'elles se distribuent de façon aléatoire dans l'aire d'étude. Nous avons déterminé le nombre de traversées de caribous par kilomètre de ces routes aléatoires, et l'avons comparé au nombre de traversées par kilomètre de la route 175 à l'aide de tests de *t*.

Le nombre de traversées par kilomètre de la route 175 était beaucoup plus faible que celui des routes distribuées aléatoirement dans l'aire d'étude (tableau 13). Ce résultat démontre que la route 175 a une influence sur les déplacements des caribous forestiers et que ceux-ci traversent la route moins souvent que ce à quoi on pourrait s'attendre selon le modèle. Les caribous forestiers réagissent donc à la présence de la route 175 en évitant de la traverser, un résultat qui est appuyé par d'autres analyses effectuées dans le cadre de cette étude.

Tableau 13. Nombre annuel de traversées/km et de traversées de la route 175 par le caribou forestier de Charlevoix, pour chaque état de route. Le nombre de traversées/km observé sur la route 175 a été comparé au taux de traversées sur 1 000 routes virtuelles distribuées aléatoirement dans l'aire de répartition de la population à l'aide de tests de t . Basé sur les données 2004-2010.

Année	Nombre de traversées/km (et nombre de traversées) de la route 175			Total	Nombre moyen de traversées/km des 1 000 routes aléatoires \pm écart-type		Valeur de t
	Avant la réfection	Pendant la réfection	Après la réfection				
2004	0,14 (13)	— ^a	—	0,14 (13)	1,00 \pm 2,13		12,83*
2005	0,21 (20)	—	—	0,21 (20)	1,19 \pm 2,68		11,61*
2006	0,06 (5)	0,07 (1)	—	0,06 (6)	1,50 \pm 2,93		15,47*
2007	0,16 (13)	0,07 (1)	—	0,15 (14)	1,87 \pm 2,26		24,09*
2008	0,04 (1)	0,26 (16)	0,38 (4)	0,22 (21)	2,98 \pm 3,89		22,44*
2009	—	0,01 (1)	0,07 (1)	0,02 (2)	2,16 \pm 3,38		19,99*
2010	—	0	0,29 (17)	0,18 (17)	2,84 \pm 3,91		21,53*
Global	(52)	(19)	(22)	0,97 (93)	14,17 \pm 16,99		24,57*

^a État de la route non disponible, voir le tableau 9.

* $P < 0,0001$.

Nous avons effectué une corrélation de Spearman entre le nombre de traversées de la route 175 par kilomètre par individu et l'année, afin de noter un éventuel changement dans le comportement des caribous forestiers qui serait lié à l'avancement des travaux de réfection. Le nombre de traversées par kilomètre par individu a montré une tendance à diminuer au fil des années ($n = 7$ ans, $r = -0,68$; $P = 0,09$). Ainsi, le taux de traversées de la route 175, bien que déjà faible avant le début des travaux de réfection de la route 175, a tout de même montré une tendance à la baisse au cours des années, pendant et après les travaux de réfection.

Nous avons évalué le taux de déplacement (en m/h) des caribous forestiers traversant la route 175 et l'avons comparé à leur taux de déplacement quelques heures avant et après la traversée (Dussault et collab., 2007). Le taux de déplacement est une estimation de la vitesse de déplacement et il se calcule en divisant la distance parcourue entre deux localisations successives (c.-à-d. la longueur du pas, en mètres) par le temps (en heures) écoulé entre ces deux localisations. Nous avons testé l'effet du pas (c.-à-d. T_0 = pendant la traversée; T_{-1} à T_{-5} = les cinq pas précédant la traversée ; T_{+1} à T_{+5} = les cinq pas suivant la traversée) sur le taux de déplacement à l'aide d'une régression multiple avec tests de comparaisons multiples de Tukey. La figure 10 montre que les caribous forestiers adoptaient un taux de déplacement significativement plus élevé lors de la traversée de la route (1011 m/h, en moyenne) que lors des autres déplacements. Le taux de déplacement du caribou forestier était aussi plus élevé au cours des deux pas précédant (T_{-1} et T_{-2}) et du pas suivant (T_{+1}) la traversée. Ces résultats suggèrent que les caribous forestiers ne traversent pas la route de façon aléatoire; ils semblent demeurer à bonne distance de la route avant de prendre la décision de s'en approcher et de la traverser. Le fait que le caribou forestier ne demeure pas longtemps à proximité de la route suggère aussi que l'environnement autour de celle-ci ne lui est pas propice. L'augmentation du taux de déplacement à proximité de la route 175 pourrait être une réponse comportementale au dérangement anthropique, comme le suggèrent Dussault et collab. (2007).

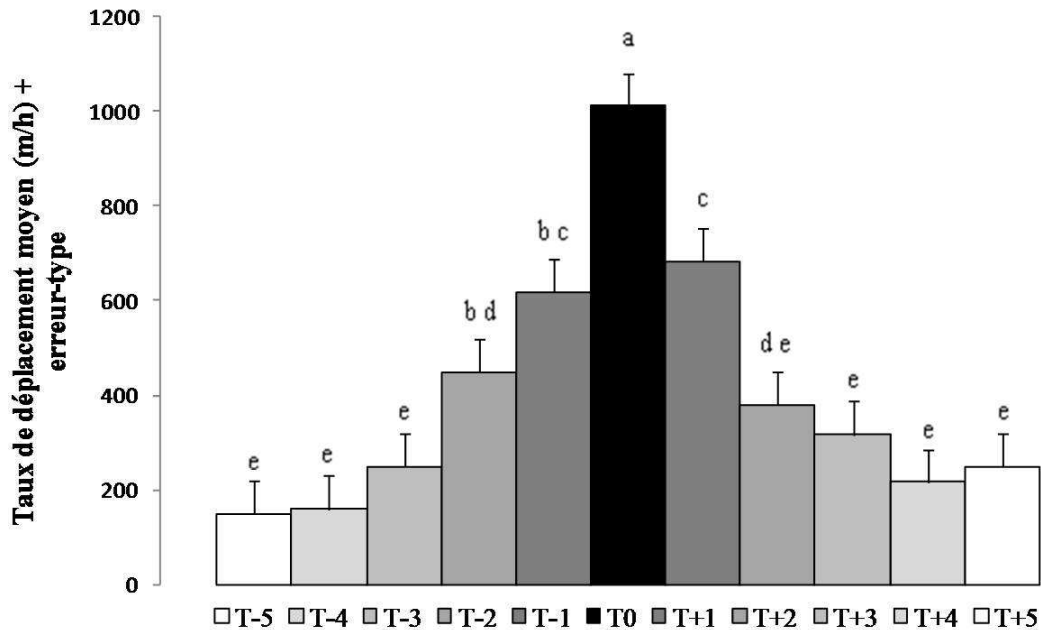


Figure 10. Taux de déplacement moyen (m/h + erreur-type) des caribous forestiers de Charlevoix lors de la traversée de la route 175 (T_0), ainsi que lors des cinq pas précédant (T_{-1} à T_{-5}) et des cinq pas suivant (T_{+1} à T_{+5}) la traversée. Les barres d'histogramme avec des lettres différentes sont significativement différentes. Basé sur les données de 2004 à 2010 ($n = 93$ traversées).

7. Influence du trafic sur le comportement du caribou forestier

Afin de déterminer si la densité du trafic sur la route 175 avait un impact sur le comportement des caribous forestiers, nous avons élaboré un indice de trafic horaire moyen basé sur les données recueillies par un compteur se trouvant au centre de l'aire d'étude (compteur électromagnétique situé à 500 m au nord de la route d'accès à la forêt Montmorency; données fournies par le MTQ). Cet indice est basé sur le trafic horaire moyen annuel i (24 valeurs différentes de \bar{x}_{heure} pour chaque heure), que nous avons modifié pour considérer les variations de trafic mensuelles (12 valeurs moyennes différentes de j pour chaque mois) et journalières (7 valeurs moyennes différentes de k pour chaque jour de la semaine). Nous avons calculé cet indice selon l'équation suivante :

$$\text{Densité de trafic} = \bar{x}_{\text{heure}_i} \times \frac{x_{\text{mois}_j}}{\bar{x}_{\text{mois}}} \times \frac{x_{\text{jour}_k}}{\bar{x}_{\text{jour}}}$$

L'indice résultant variait entre 18 et 786 véhicules/heure (v/h) durant l'année, avec une médiane de 186 v/h. Nous avons donc pu attribuer une densité de trafic à chaque localisation télémétrique, en nous basant sur la date et l'heure. De plus, notre indice de trafic nous a permis d'analyser les impacts du trafic sur le comportement du caribou forestier de façon plus directe que dans les autres études publiées à ce jour, qui supposaient simplement que le trafic augmentait sur les routes les plus larges.

À l'aide de régressions log-linéaires, nous avons testé si la fréquence des localisations télémétriques trouvées à proximité de la route 175 (dans les zones de 1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d'autre de la route 175 présentées à la figure 3) était influencée par la densité de trafic (faibles et fortes densités établies en deçà ou au-dessus de la médiane de 186 v/h, respectivement). Les caribous forestiers n'ont pas été observés moins fréquemment dans les zones de 1 250, 2 500 ou 5 000 m de part et d'autre de la route 175 lorsque la densité de trafic était élevée (tableau 14), contrairement à ce que montrent des études réalisées sur d'autres espèces de grands herbivores (p. ex. celle de Gagnon et collab., 2007). De la même façon, les traversées de la route 175 par les caribous forestiers sont survenues lorsque la densité de trafic était plus élevée que la valeur médiane (figure 11). En résumé, les caribous forestiers n'ont pas choisi les moments où le dérangement humain était le plus faible pour traverser la route ou encore pour fréquenter ses abords.

Nous avons aussi testé, à l'aide d'une régression linéaire, l'effet de la densité du trafic sur le taux de déplacement (en m/h) des caribous forestiers traversant la route. Or, c'est plutôt sur cette variable que nous avons découvert un impact de la densité de trafic sur le comportement du caribou forestier. En effet, ceux-ci ont traversé la route 175 avec un taux de déplacement significativement plus élevé durant les périodes où le trafic était plus dense ($P = 0,04$). Ainsi, les caribous forestiers traversaient tout de même la route lorsque le trafic était élevé, mais modifiaient leur taux de déplacement, en traversant la route

encore plus rapidement. Nous interprétons ce comportement comme une réaction du caribou forestier à l'augmentation du dérangement occasionné par les densités élevées de trafic. Ce résultat est important, puisque le MTQ prévoit une hausse à long terme de la densité moyenne de trafic journalier sur la nouvelle route 175.

Tableau 14. Estimés de paramètres des régressions log-linéaires évaluant l'influence de la densité de trafic sur la fréquence des localisations de caribous forestiers de Charlevoix trouvées dans chaque zone le long de la route 175 (1 250, 2 500 et 5 000 m). Un estimé de paramètre positif signifie que le nombre de localisations est plus élevé dans une zone donnée lorsque la densité de trafic est supérieure à la médiane de 186 v/h.

	Zone de 1 250 m	Zone de 2 500 m	Zone de 5 000 m
<i>Densité du trafic (Catégorie de référence : Faible)</i>			
Élevée	0,252*	-0,034	-0,004

* $P < 0,05$.

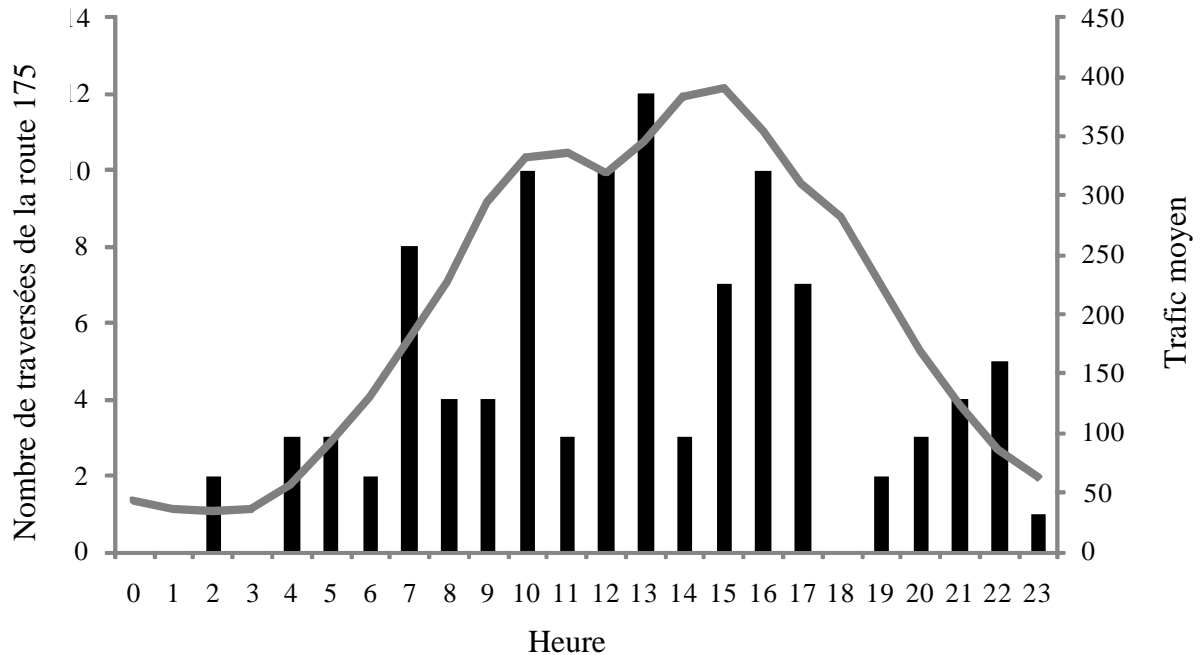


Figure 11. Horaire des traversées de la route 175 par les caribous forestiers de Charlevoix, de 2004 à 2012 (mêmes données que la figure 9), en fonction du nombre moyen de véhicules par heure horaire moyen (—) mesuré en 2004.

8. Sélection d'habitat multiéchelle du caribou forestier

Les animaux tirent les éléments nécessaires à leur survie, à leur croissance et à leur reproduction des ressources disponibles dans leur habitat, selon les restrictions imposées par leur physiologie et leur environnement (Aarts et collab., 2008). Les animaux « sélectionnent » les ressources en utilisant certaines composantes biologiques et abiotiques de façon disproportionnée par rapport à leur disponibilité dans l'environnement (Block et Brennan, 1993). Évidemment, les animaux doivent aussi réagir aux contraintes présentes dans leur environnement (p. ex. sources de dérangement anthropique; Morrison, 2001). La sélection d'habitat est une interaction complexe entre l'animal et son environnement qui explique la distribution des individus dans le paysage et qui a, en théorie, une influence majeure sur leur valeur adaptative (Garshelis, 2000). L'étude de la sélection d'habitat a donc été préconisée dans ce projet de recherche afin d'évaluer les impacts des routes asphaltées (dont la route 175) et des chemins forestiers sur le comportement du caribou forestier. Selon Rettie et Messier (2000), la hiérarchie spatiale observée dans la sélection des ressources reflète la hiérarchie des facteurs limitant la valeur adaptative des animaux. Le comportement de sélection d'habitat s'exprime donc différemment en fonction de l'échelle spatiale. Pour bien documenter l'influence des routes sur le comportement du caribou forestier, il semblait essentiel, premièrement, d'évaluer la sélection d'habitat du caribou forestier avant le début du projet de réfection de la route 175 et, deuxièmement, de déterminer la ou les meilleures échelles spatiales à employer pour étudier ce comportement.

La première étape a donc été d'utiliser les données télémétriques de 2004 à 2006 seulement (soit avant le début des travaux de réfection de la route 175) pour évaluer la sélection d'habitat du caribou forestier en l'absence de chantiers routiers, en comparant diverses échelles spatiales établies selon un gradient allant de l'échelle locale à différentes échelles paysagères.

8.1 Sélection d'habitat du caribou forestier avant la réfection de la route

Notre approche a consisté à évaluer, à plusieurs échelles, la sélection d'habitat du caribou forestier pour chacune des variables d'habitat présentées à la section 3 et à conserver seulement la meilleure échelle pour les analyses ultérieures. À l'échelle locale, nous avons attribué la valeur des variables d'habitat (classes d'habitat, topographie et la distance minimale à une route active et à un chemin forestier) trouvées directement au site de chaque localisation télémétrique. Une difficulté associée aux variables de distance est qu'elles sont continues et présupposent un effet linéaire jusqu'à l'infini. Autrement dit, en utilisant une variable de distance brute, on suppose qu'un animal qui se trouverait, par exemple, à 100 km d'une route, percevrait cette route différemment d'un autre se trouvant à 75 km ou à 50 km. Cette supposition est évidemment erronée, puisque le rayon de perception des animaux a une limite (Olden et collab., 2004).

Un moyen de contourner ce problème est l'utilisation de variables de distance tronquées. Par exemple, une variable de distance à la route tronquée à 2 km suppose que les réactions comportementales d'un animal seront principalement détectables dans un rayon de 2 km autour de la route, et que les individus retrouvés plus loin auront des réponses plutôt négligeables. Or, nous n'avons aucune connaissance *a priori* sur le rayon de perception des caribous forestiers par rapport aux routes et nous avons donc choisi de le déterminer de façon empirique. Nous avons établi la meilleure distance de troncature à l'aide du critère d'information Bayésien (BIC; Schwarz, 1978) en comparant plusieurs modèles candidats. Le BIC pénalise davantage les modèles surparamétrés ayant un grand effectif que le critère d'information d'Akaike (AIC), plus commun dans la littérature. Tout comme avec l'AIC, le modèle qui doit être retenu (c.-à-d. le modèle le plus parcimonieux) est celui ayant la valeur de BIC la plus petite (Burnham et Anderson, 2002). Les modèles candidats étaient composés de variables de distance aux routes actives et aux chemins forestiers qui étaient soit continues, soit tronquées à 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 1,75 et 2 km.

Nous avons ainsi déterminé que les meilleures distances tronquées aux routes étaient de 1,25 km pour les routes actives et de 0,75 km pour les chemins forestiers (tableau 15).

Cela découle du fait que la réaction négative des caribous forestiers est plus forte près des routes, et s'estompe pour devenir relativement constante à partir d'une certaine distance (c.-à-d. la distance tronquée obtenue). Cela ne veut pas dire que les caribous forestiers situés à plus de 1,25 km des routes n'étaient pas dérangés par celles-ci. D'ailleurs, certains individus pourraient avoir établi leur domaine vital loin des routes justement parce qu'ils y étaient particulièrement sensibles. Par contre, les distances tronquées que nous avons obtenues permettent de décrire le patron d'évitement le plus commun dans la population.

Il est intéressant de noter que les distances tronquées que nous avons obtenues sont plus faibles que celles rapportées dans d'autres études sur le caribou (p. ex. 2 km, Polfus et collab., 2011; 3 km, Mahoney et Schaefer, 2002; 4 km, Nellemann et collab., 2003; 8 km, Dahle et collab., 2008). Nous croyons que la diversité observée dans les distances d'évitement d'une étude à l'autre dépend, d'une part, des niveaux d'intensité variables des différentes sources de dérangement évaluées et, d'autre part, de la qualité et de l'accessibilité des ressources environnantes (Gill et collab., 2001). Sur ce point, la région de Charlevoix est une aire d'étude particulièrement modifiée par les perturbations anthropiques. En effet, la distance maximale à laquelle un caribou forestier peut y éviter une route est relativement faible, puisque l'évitement d'une route mène invariablement à la proximité d'une autre. Les caribous forestiers pourraient tout simplement avoir été incapables d'éviter les routes sur de plus grandes distances. Dans la même région, Laurian et collab. (2008) ont démontré un évitement marqué des chemins forestiers (jusqu'à 1 km) par l'orignal, une espèce considérée comme moins sensible au dérangement anthropique que le caribou forestier.

Tableau 15. Support relatif des différents modèles de sélection d'habitat par le caribou forestier de Charlevoix utilisant des distances tronquées aux routes actives et aux chemins forestiers. La log-vraisemblance (LL) et la différence entre chaque modèle et le meilleur modèle selon le critère BIC (Δ BIC) sont présentées.

Rang	Modèle candidat	LL	Δ BIC	
	Distance à une route active (km)	Distance à un chemin forestier (km)		
1	1,25	+ 0,75	-79551	0,0
2	1,25	+ 1	-79597	92,6
3	1,25	+ 0,5	-79615	129,6
4	1,25	+ 1,25	-79681	259,9
5	1,25	+ 1,5	-79830	558,6
6	1,25	+ 1,75	-79986	870,7
7	1,25	+ 0,25	-80070	1038,9
8	1,25	+ 2	-80110	1117,7
9	1,25	+ Continue	-80448	1794,4
10	1	+ Continue	-80467	1832,9
11	1,5	+ Continue	-80513	1924,4
12	0,75	+ Continue	-80575	2048,9
13	1,75	+ Continue	-80703	2303,9
14	0,5	+ Continue	-80793	2484,8
15	2	+ Continue	-80958	2815,0
16	0,25	+ Continue	-81250	3399,3
17	Continue	+ Continue	-81817	4532,5

En plus de nous intéresser à l'échelle locale, nous voulions aussi caractériser le contexte entourant chaque localisation télémétrique afin de vérifier si les échelles paysagères expliquaient plus efficacement la sélection d'habitat du caribou forestier. Nous avons donc calculé, à l'intérieur de zones circulaires de 1, 2, 4 et 8 km de rayon autour de chaque localisation, le pourcentage de chaque classe d'habitat, le coefficient de variation de l'altitude et de la pente, et la densité (km/km²) des routes actives et des chemins forestiers (séparément, puis ensemble).

Nous avons analysé la sélection d'habitat avec des fonctions de sélection des ressources (*resource selection function*, RSF; Manly et collab., 2002). Les nombreuses variables d'habitat obtenues à diverses échelles de sélection ont pu être incluses simultanément dans les analyses. Nous avons réalisé des régressions logistiques mixtes comparant les caractéristiques de l'habitat aux sites utilisés par les caribous forestiers (localisations observées) avec les caractéristiques de l'habitat à des localisations tirées aléatoirement dans le paysage. La disponibilité des ressources a été évaluée à l'intérieur du domaine vital annuel de chaque individu, en tirant un nombre de localisations aléatoires égal au nombre de localisations observées. Les modèles ont été réalisés pour chacune des saisons présentées à la figure 4.

Avant de commencer les analyses, nous avons d'abord retranché un des deux individus qui sont demeurés sur l'Acropole des Draveurs (Parc national des Hautes-Gorges-de-la-Rivière-Malbaie) durant toute l'étude, pour éviter de donner trop de poids à un comportement marginal dans la population (Millsbaugh et collab., 1998). Nous avons aussi réalisé des analyses de colinéarité et avons écarté les variables colinéaires (Graham, 2003). Nous avons inclus comme effets aléatoires l'individu, afin de considérer la dépendance entre les données portant sur les mêmes individus, ainsi que l'année, afin de considérer, entre autres, la possibilité que le comportement des individus ait été différent d'une année à l'autre (Gillies et collab., 2006). Enfin, après des analyses préliminaires, nous avons centré l'altitude autour de la moyenne et nous avons inclus l'altitude au carré. Nous avons finalement évalué la robustesse des modèles les plus parcimonieux à l'aide d'une méthode de validation croisée adaptée de la *k-fold cross validation* (Boyce et

collab., 2002). Le résultat du processus de validation est un coefficient de corrélation de Spearman, où une valeur élevée de r signifie qu'un modèle est robuste.

La détermination des meilleures échelles de sélection et des meilleurs modèles expliquant la sélection d'habitat du caribou forestier a été réalisée en trois étapes. D'abord, nous avons déterminé le meilleur modèle à l'échelle locale (c.-à-d. pour les variables mesurées directement aux localisations, dont les variables de distance aux routes tronquées). Comme mentionné précédemment, ce modèle a permis de retenir des variables de distance aux routes actives et aux chemins forestiers tronquées à 1,25 km et 0,75 km, respectivement (voir le tableau 15). Ensuite, nous avons ajouté à ce modèle local les variables représentant le contexte paysager autour des localisations télémétriques. Pour chaque variable, nous avons évalué un modèle pour chacune des quatre échelles spatiales différentes (1, 2, 4 et 8 km), dans le but de trouver la meilleure échelle pour mesurer chaque variable d'habitat. La meilleure échelle de sélection pour chaque variable était retenue à l'aide du critère BIC, ce que nous appellerons ci-après la sélection intragroupe. Finalement, en utilisant chaque variable calculée à la meilleure échelle possible, nous avons élaboré une série de modèles candidats qui regroupaient diverses combinaisons des trois « groupes » de variables utilisées, soit les classes d'habitat, la topographie et les routes. Ces modèles ont aussi été comparés à l'aide du critère BIC (ce que nous appelons la sélection intergroupe). Cette démarche a permis de distinguer notre étude des autres analyses de sélection d'habitat couramment utilisées, notamment par la justesse des conclusions qu'elle a permis d'obtenir.

Le tableau 16 présente les résultats du processus de détermination de la meilleure échelle de sélection pour chacune des variables représentant le contexte paysager entourant chaque localisation télémétrique dans des cercles de 1, 2, 4 ou 8 km de rayon. On peut y constater que la meilleure échelle de sélection retenue n'était pas toujours la même, qu'elle variait selon les saisons et les variables d'habitat (différences de BIC intragroupes). Par exemple, l'échelle paysagère exprimant le mieux l'évitement des routes par le caribou forestier était généralement vaste, soit de 8 km de rayon, sauf durant le rut, où elle était plutôt de 2 km. Cette différence pourrait émaner du fait que les

caribous forestiers se déplacent davantage durant le rut à la recherche de partenaires sexuels et qu'ils sont peut-être alors moins sensibles au dérangement causé par les routes. Ainsi, la perception et la réponse des caribous forestiers par rapport aux ressources et aux contraintes de leur habitat semblaient différer selon leurs propres besoins et en fonction de l'hétérogénéité des ressources dans le paysage. On peut aussi remarquer dans le tableau 16 que les classes d'habitat sont le groupe de variables expliquant le mieux la sélection d'habitat du caribou forestier (plus petites valeurs de BIC intergroupes).

Tableau 16. Support relatif des modèles déterminant la meilleure échelle de sélection pour chaque variable expliquant la sélection d'habitat saisonnière du caribou forestier de Charlevoix avant la réfection de la route 175, de 2004 à 2006. Le nombre de localisations télémétriques (n), le nombre de paramètres (k) et les différences de BIC (Δ BIC) intragroupes (même variable, échelles différentes) et intergroupes (variables différentes, même meilleure échelle) sont présentés. Les valeurs de Δ BIC des modèles intragroupes et intergroupes retenus sont en caractères gras.

Modèle candidat	k	Hiver			Printemps			Mise bas			Été			Rut		
		Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC	Inter- groupe Δ BIC	Intra- groupe Δ BIC
		$(n = 21\ 750)$			$(n = 12\ 904)$			$(n = 10\ 595)$			$(n = 13\ 695)$			$(n = 6\ 565)$		
Routes actives, 1 km	14	201,45		10,59		397,15		0,00		3462,59		71,46				
Routes actives, 2 km	14	170,43		0,39		344,40		75,74				23,22				
Routes actives, 4 km	14	0,00	4667,30	25,07		0,00	3104,13	69,40				0,00		1497,97		
Routes actives, 8 km	14	108,46		0,00	1828,58	178,46		64,34				95,74				
Chemins forestiers, 1 km	14	364,97		321,90		362,86		122,39				196,55				
Chemins forestiers, 2 km	14	0,00	3981,32	247,58		234,32		144,30				0,00		1087,87		
Chemins forestiers, 4 km	14	455,40		186,37		96,28		207,60				232,62				
Chemins forestiers, 8 km	14	26,78		0,00	1407,58	0,00	2898,22	0,00		2833,78		367,06				
Routes totales, 1 km	14	272,75		339,73		531,50		42,65				236,77				
Routes totales, 2 km	14	0,00	4119,02	307,24		305,50		118,84				0,00		1030,16		
Routes totales, 4 km	14	450,86		237,83		82,11		157,59				254,57				

<i>(Suite)</i>										
Routes totales, 8 km	14	7,52	0,00	1383,16	0,00	2770,26	0,00	2873,38	426,36	
Topographie, 1 km	15	151,19	597,14	802,63		2292,79		107,66		
Topographie, 2 km	15	387,52	734,12	645,73		1243,19		0,00	1312,41	
Topographie, 4 km	15	256,66	853,81	324,01				1034,94	3,53	
Topographie, 8 km	15	0,00	4478,16	808,52	0,00	2638,60	775,93		139,45	
Classes d'habitat, 1 km	21	545,97	0,00	0,00	2544,73		2588,82		1101,59	
Classes d'habitat, 2 km	21	335,24	659,97		2489,95		2585,05		941,59	
Classes d'habitat, 4 km	21	0,00	0,00		1772,40		1982,81		893,18	
Classes d'habitat, 8 km	21	978,63	397,70		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Local	13	0,00	4897,32	0,00	1845,11	0,00	3522,28	0,00	3545,59	0,00
										1590,54

Le tableau 17 présente la sélection des modèles incluant les variables d'habitat mesurées aux meilleures échelles possible. On peut constater que le meilleur modèle à l'hiver retient seulement les variables de topographie et de classes d'habitat, alors que les modèles retenus durant le reste de l'année incluent les trois groupes de variables (classes d'habitat, topographie et routes). Enfin, le tableau 18 montre les estimés de paramètres et leur intervalle de confiance à 95 % pour l'ensemble des variables d'habitat considérées dans les modèles saisonniers les plus parcimonieux seulement. Le tableau 18 présente donc, en quelque sorte, l'importance que revêt chaque variable d'habitat pour le caribou forestier lors de sa sélection d'habitat saisonnière. La classe d'habitat des conifères matures 50-70 ans a été utilisée comme habitat de référence et on ne trouve donc pas d'estimé de paramètre pour cette catégorie. Statistiquement, elle est égale à 0 et les estimés de paramètre des autres classes d'habitat sont calculés par rapport à cette catégorie.

Ces analyses démontrent qu'il est important de considérer à la fois des variables mesurées à l'échelle locale et à l'échelle paysagère pour bien comprendre la sélection d'habitat du caribou forestier. Nos fonctions de sélection des ressources ont donné des résultats très robustes ($r \geq 0,949$, $P < 0,001$), démontrant que les modèles complets intégrant les classes d'habitat, la topographie et les routes expliquaient bien la sélection d'habitat du caribou forestier.

Tableau 17. Support relatif des modèles de sélection d'habitat saisonnière par le caribou forestier de Charlevoix avant la réfection de la route 175, de 2004 à 2006. L'échelle utilisée pour mesurer chaque variable était la meilleure, comme déterminé au tableau 16. Les valeurs de ΔBIC des modèles saisonniers retenus sont en caractères gras.

Modèle candidat	<i>k</i>	Hiver	Printemps	Mise bas	Été	Rut
Local	13	5333,28	2727,40	4025,81	5764,13	2227,20
Local + Densité de routes	14	4417,28	2265,45	3273,79	5052,32	1666,82
Local + Topographie	15	4914,12	1690,81	3142,13	3253,48	1949,07
Local + Classes d'habitat	21	435,96	882,29	503,53	2218,54	636,66
Local + Densité de routes + Topographie	16	4055,33	1651,44	2669,99	2862,20	1390,65
Local + Densité de routes + Classes d'habitat	22	553,64	597,73	262,37	1854,03	172,46
Local + Topographie + Classes d'habitat	23	0,00	63,77	159,82	406,07	380,34
Local + Densité de routes + Topographie + Classes d'habitat	24	141,63	0,00	0,00	0,00	0,00
Classes d'habitat						

Tableau 18. Estimés de paramètres (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95%) des meilleurs modèles expliquant la sélection d'habitat saisonnière du caribou forestier de Charlevoix avant la réfection de la route 175, de 2004 à 2006. L'échelle utilisée pour mesurer chaque variable était la meilleure, comme déterminé au tableau 16. Les résultats de la validation (corrélation de Spearman, r) sont également présentés. Il est à noter qu'un coefficient supérieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie une sélection, tandis qu'un coefficient inférieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie un évitement, sauf pour les variables de distance aux routes, pour lesquelles l'interprétation est inversée.

Variable	Hiver (n = 21 750)		Printemps (n = 12 904)		Mise bas (n = 10 595)		Été (n = 13 695)		Rut (n = 6 565)	
	β	IC 95 %	β	IC 95 %	β	IC 95 %	β	IC 95 %	β	IC 95 %
<i>Sélection locale</i>										
<i>Classes d'habitat^e</i>										
Conifères matures \geq 90 ans	0,50	0,22:0,78	0,37	0,07:0,66	0,08	-0,19:0,36	-0,04	-0,35:0,28	1,35	1,00:1,71
Milieux riches en lichen	1,29	0,89:1,69	1,35	0,94:1,76	1,00	0,45:1,56	0,90	0,31:1,50	2,42	1,95:2,90
Milieux humides	0,94	0,43:1,46	0,32	-0,25:0,88	1,30	0,75:1,85	1,02	0,71:1,34	1,96	1,64:2,27
Décidus matures	0,18	-0,35:0,70	-0,17	-0,95:0,61	2,09	1,38:2,79	1,30	0,66:1,93	0,37	-0,84:1,58
Perturbations \leq 5 ans	0,65	0,32:0,98	0,43	0,17:0,69	0,97	0,56:1,37	1,63	1,27:2,00	2,05	1,70:2,40
Perturbations 6-20 ans	0,14	-0,27:0,55	0,52	0,23:0,82	0,29	-0,17:0,75	0,49	0,16:0,83	1,61	1,13:2,09
Régénération $>$ 20 ans	-0,82	-1,26:-0,38	0,15	-0,25:0,55	-1,14	-1,61:-0,68	-1,23	-1,62:-0,84	-0,59	-1,01:-0,16
Autres	0,73	-0,17:1,62	1,01	0,04:1,98	0,52	-0,32:1,36	0,30	-0,26:0,86	1,17	0,24:2,10

Topographie

Altitude (m)	0,01	0,01:0,01	0,01	<0,01:0,01	0,01	<0,01:0,01	<0,01	<0,01:0,01	<0,01	<0,01:0,01
Altitude ²	<0,01	<0,01:<0,01	<0,01	<0,01:<0,01	<0,01	<0,01:<0,01	<0,01	<0,01:<0,01	<0,01	<0,01:<0,01
Pente (°)	-0,04	-0,06:-0,02	-0,04	-0,06:-0,03	-0,03	-0,05:-0,01	-0,05	-0,07:-0,03	-0,08	-0,09:-0,06

Distance aux routes (km)

Routes actives	1,45	1,08:1,81	0,23	-0,28:0,75	0,82	0,21:1,43	1,30	0,86:1,73	0,63	0,15:1,11
Chemins forestiers	1,82	1,34:2,30	-0,89	-1,73:-0,04	1,35	0,60:2,09	0,63	-0,08:1,33	0,13	-0,46:0,71

Sélection paysagère

Classes d'habitat (%)^a

Conifères matures 90 ans	1,04	-1,24:3,32	0,62	-0,61:1,85	-2,94	-7,51:1,63	-1,09	-5,91:3,73	-5,45	-9,81:-1,08
Milieux riches en lichen	17,00	12,33:21,67	4,83	0,17:9,49	-41,53	-66,79:-16,26	-44,64	-70,22:-19,07	-2,51	-21,61:16,59
Milieux humides	0,14	-18,79:19,07	4,84	1,15:8,54	-11,06	-73,72:51,59	-14,41	-65,27:36,46	35,13	2,69:67,56
Décidus matures	-5,10	-16,86:6,66	3,34	-0,61:7,29	28,22	8,92:47,51	18,76	-4,27:41,79	-4,69	-26,21:16,84
Perturbations ≤ 5 ans	-2,77	-6,60:1,06	0,92	-0,29:2,13	-8,46	-16,62:-0,30	-9,10	-16,78:-1,42	-15,31	-21,92:-8,70
Perturbations 6-20 ans	1,19	-1,85:4,23	1,46	0,27:2,65	-4,46	-13,07:4,16	-3,43	-10,72:3,85	-13,84	-20,81:-6,88
Régénération > 20 ans	2,36	-0,24:4,95	-4,03	-5,74:-2,32	0,67	-4,34:5,68	2,49	-2,97:7,94	0,09	-3,26:3,45
Autres	-10,73	-17,66:-3,80	-1,44	-3,33:0,46	-10,71	-33,12:11,69	2,23	-23,05:27,51	28,04	10,57:45,50

<i>Topographie</i>										
CV ^b de l'altitude	8,00	-0,68:16,68	3,46	-3,69:10,60	- ^c	-	-16,22	-28,13:-4,31	-9,46	-19,27:0,35
CV de la pente	0,69	-3,73:5,12	-6,17	-10,65:-1,70	-7,49	-14,67:-0,32	-11,15	-15,28:-7,02	-3,09	-4,64:-1,55
<i>Densité de routes, km/km²</i>										
Densité de chemins forestiers, échelle 8 km							-1,12	-1,85:-0,40		
Densité de routes (actives + chemins)			-0,47	-1,05:0,10	-0,91	-1,72:-0,10			-0,77	-0,93:-0,60
<i>Effet aléatoire (individu [année])</i>	1,33	-0,93:3,59	0,29	-0,13:1,01	0,36	-0,14:0,85	1,23	-3,16:5,62	0,30	-0,44:1,04
<i>Validation (Spearman r)</i>		0,949		0,982		0,999		0,984		0,996

^a Catégorie de référence : Conifères matures 50-70 ans.

^b CV = coefficient de variation.

^c Les variables colinéaires ont été retirées des modèles (indiqué par un -).

Si nous portons attention aux impacts des routes sur la sélection d'habitat du caribou forestier (cela en sachant que l'effet des autres variables d'habitat est pris en compte; voir Leblond et collab., 2011 pour une interprétation plus détaillée des autres variables d'habitat), il est intéressant de noter que les caribous forestiers ont évité les routes actives ainsi que les chemins forestiers aux deux principales échelles analysées, soit à l'échelle locale et à l'échelle paysagère. Les localisations télémétriques se trouvaient donc à une distance significativement plus élevée des routes que les localisations aléatoires (échelle locale), et la densité des routes était plus faible autour des localisations télémétriques qu'autour des localisations aléatoires (échelle paysagère).

L'évitement des routes par le caribou forestier est un comportement qui a été rapporté fréquemment dans la littérature (p. ex. Dyer et collab., 2001, 2002; Courbin et collab., 2009; Bowman et collab., 2010; Polfus et collab., 2011). Toutefois, notre analyse de sélection d'habitat multiéchelle a permis de démontrer que les caribous forestiers n'évitaient pas seulement les routes à l'échelle locale, mais aussi à une échelle paysagère beaucoup plus vaste. Nous concluons que la présence d'une route peut influencer sur la répartition spatiale des caribous forestiers, et que l'augmentation de la densité des routes dans le paysage est néfaste puisqu'elle risque de causer une perte d'habitat fonctionnel pour cette espèce (Dennis et collab., 2003).

8.2 *Sélection d'habitat du caribou forestier pendant et après la réfection de la route*

L'étape suivante consistait à déterminer si la réfection de la route 175 se traduisait par un évitement encore plus important chez le caribou forestier. Nous nous sommes donc attardés à la sélection d'habitat du caribou forestier par rapport à la route 175 avant, pendant et après le projet de réfection, soit de 2004 à 2010. Le niveau de dérangement observé autour de la route 175 était ainsi fonction de l'état d'avancement des travaux de réfection et variable dans l'espace et dans le temps. Les analyses que nous avons réalisées pour cette partie de l'étude étaient sensiblement les mêmes que dans la section précédente, à la différence près qu'elles ont été réalisées sur la base de l'ensemble des données télémétriques (2004-2010).

Nous avons évalué un modèle global incluant l'ensemble des localisations télémétriques, et afin de bien décrire le comportement du caribou forestier à proximité de la route 175, nous avons aussi testé l'effet des mêmes variables dans des zones de 1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d'autre de la route (voir la figure 3). Nous avons ajouté à nos modèles des interactions entre la distance à la route et l'état d'avancement des travaux (avant, pendant, ou après la réfection), pour déterminer si les réactions du caribou forestier envers la route dépendaient du niveau d'intensité du dérangement qui y était associé. Cette approche nous a permis de mieux évaluer les effets de la route 175 (notamment l'effet des chantiers de construction) sur le comportement des individus les plus près de la route.

Le modèle de sélection d'habitat basé sur l'ensemble des localisations télémétriques (modèle global) a révélé que les caribous forestiers évitaient significativement la route 175 à l'échelle de leur domaine vital annuel (tableau 19). Seulement 1 713 (0,47%), 6 974 (1,92%) et 16 067 (4,41%) localisations télémétriques se trouvaient dans les zones de 1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d'autre de la route, respectivement. Cela est 1,3 à 2,3 fois moins que le nombre de localisations aléatoires. Les modèles estimés ont aussi démontré que les caribous forestiers évitaient la route 175, c'est-à-dire que les localisations observées étaient significativement plus loin de la route 175 que les localisations aléatoires. Un résultat particulièrement frappant est qu'à l'intérieur de ces zones, les caribous forestiers ont évité toutes les classes d'habitat (sauf les milieux humides à 5 000 m et les zones sous lignes de transport d'énergie), même celles qu'ils sélectionnaient ailleurs dans leur domaine vital annuel. L'évitement de toutes les classes d'habitat naturel par le caribou forestier jusqu'à 5 000 m de la route 175 démontre que les bénéfices potentiels procurés par l'utilisation des ressources que les individus auraient pu y trouver n'étaient pas suffisants pour compenser le risque perçu près de la route. Nos résultats suggèrent donc que le dérangement occasionné par la route 175 a détérioré la qualité de l'habitat perçue par le caribou forestier jusqu'à 5 000 m de la route.

Tableau 19. Estimés de paramètres (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) des modèles expliquant la sélection d'habitat du caribou forestier de Charlevoix, de 2004 à 2010. Un modèle global a été estimé en utilisant l'ensemble des localisations télémétriques, puis des modèles ont été estimés dans des zones de 1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d'autre de la route 175. Les résultats de la validation (corrélation de Spearman, r) sont également présentés. Il est à noter qu'un coefficient supérieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie une sélection, tandis qu'un coefficient inférieur à 0 (pour un intervalle de confiance excluant 0) signifie un évitement, sauf pour les variables de distance aux routes, pour lesquelles l'interprétation est inversée.

Variable	Zone de 1 250 m autour de la route 175 ($n = 1713$)		Zone de 2 500 m autour de la route 175 ($n = 6974$)		Zone de 5 000 m autour de la route 175 ($n = 16 067$)		Toutes les localisations ($n = 364 100$)	
	β	IC 95 %	β	IC 95 %	β	IC 95 %	β	IC 95 %
<i>Classes d'habitat^a</i>								
Conifères matures ≥ 90 ans	-1,11	-1,37:-0,85	-1,15	-1,27:-1,03	-0,48	-0,55:-0,42	0,31	0,15:0,47
Milieux riches en lichen					-1,04	-1,80:-0,28	1,90	1,68:2,12
Milieux humides	-0,23	-0,57:0,12	-0,25	-0,49:-0,01	1,01	0,91:1,12	0,90	0,77:1,04
Décidus matures			-1,29	-1,62:-0,96	-0,77	-0,94:-0,59	0,43	-0,07:0,93
Perturbations ≤ 5 ans	-0,56	-0,81:-0,31	-0,55	-0,69:-0,40	-0,16	-0,23:-0,08	1,37	1,18:1,56
Perturbations 6-20 ans	-1,28	-1,82:-0,74	-0,40	-0,59:-0,22	-0,41	-0,52:-0,30	0,34	0,17:0,51
Régénération > 20 ans	-2,38	-2,77:-1,99	-2,10	-2,28:-1,92	-1,90	-2,02:-1,78	-0,87	-1,04:-0,71
Autres	-3,27	-3,82:-2,72	-2,89	-3,34:-2,44	-0,80	-0,95:-0,65	-0,61	-0,76:-0,46
Lignes de transport d'énergie	2,29	1,98:2,60	2,46	2,21:2,72	2,23	2,01:2,44	4,28	3,89:4,67

<i>Topographie</i>										
Altitude (km)	-5,86	-7,51:-4,20	-1,43	-2,57:-0,30	2,86	2,42:3,31	2,12	0,69:3,56		
Altitude ²	130,05	108,46:151,63	75,95	63,06:88,85	17,11	12,24:21,98	5,80	-0,61:12,22		
Pente (°)	-0,02	-0,04:<0,01	0,05	0,04:0,06	0,04	0,03:0,04	-0,03	-0,04:-0,02		
<i>Distance à la route I75</i>										
Distance minimale (km)	0,57	0,29:0,85	0,82	0,73:0,91	0,04	0,01:0,06	0,03	0,01:0,05		
<i>Interaction entre la distance minimale à la route I75 (km) et l'état des travaux^b</i>										
Pendant la réfection	-0,81	-1,35:-0,28	-0,14	-0,27:-0,01	0,05	0,01:0,09				
Après la réfection	-2,07	-2,59:-1,54	-2,95	-3,30:-2,60	-0,18	-0,24:-0,12				
<i>Effet aléatoire (individu [année])</i>										
Validation (Spearman r)	0,854		0,955		0,935		0,11	-0,08:0,31		0,961

^a Catégorie de référence : Conifères matures 50-70 ans.

^b Catégorie de référence : Avant la réfection.

Contrairement à nos attentes, les localisations télémétriques des caribous forestiers trouvées dans les zones de 1 250, 2 500 et 5 000 m de part et d'autre de la route 175 étaient situées plus près de la route pendant et après les travaux de réfection qu'avant les travaux. Pour mieux comprendre ce résultat, nous avons réalisé une analyse additionnelle. Ainsi, à l'aide de régressions log-linéaires, nous avons testé si la fréquence des localisations télémétriques trouvées dans chaque zone de part et d'autre de la route était influencée par l'état d'avancement des travaux (avant, pendant ou après la réfection).

Ces analyses démontrent que les caribous forestiers ont diminué leur fréquentation des abords de la route 175 pendant et après les travaux de réfection (tableau 20). Cela veut donc dire que moins de localisations télémétriques de caribous forestiers étaient observées dans les zones à proximité de la route 175 pendant et après les travaux de réfection, même si celles-ci étaient trouvées plus près de la route. Ce résultat pourrait être dû à l'utilisation par quelques individus de l'emprise de la ligne de transport d'énergie qui traverse et longe la route 175 sur plusieurs kilomètres. En effet, ces individus pourraient avoir toléré de plus hauts niveaux de dérangement, dans le but de continuer à profiter des avantages liés à l'utilisation de l'emprise de la ligne de transport d'énergie (Charbonneau, 2011). Il faut comprendre que ces individus n'utilisaient pas la route à proprement parler, mais plutôt un habitat limitrophe.

Tableau 20. Estimés des paramètres des régressions log-linéaires évaluant l'influence de l'état d'avancement des travaux de réfection de la route 175 sur la fréquence des localisations de caribous forestiers de Charlevoix trouvées dans chaque zone de part et d'autre de la route 175 (1 250, 2 500 et 5 000 m). Un estimé de paramètre négatif signifie que le nombre de localisations était plus faible que durant l'état de référence, soit avant le début des travaux de réfection.

	Zone de 1 250 m	Zone de 2 500 m	Zone de 5 000 m
<i>État de la route (Catégorie de référence : Avant)</i>			
Pendant	-0,783*	0,016	-0,046*
Après	-0,169*	-1,481*	-1,448*

* $P < 0,05$.

9. Performance individuelle et survie du caribou forestier

Au moins trois collisions routières impliquant un caribou forestier (non porteur de collier GPS) se sont produites sur la route 175 au cours des huit années qu'a duré le suivi télémétrique. Ce nombre relativement faible n'est pas surprenant, étant donné que la plupart des individus évitent la route aux échelles locale et paysagère. Par conséquent, la stratégie d'évitement du caribou forestier semble offrir une protection adéquate contre la mortalité directe sur la route (Jaeger et collab., 2005). Néanmoins, la mort d'individus adultes participant à la reproduction peut avoir des impacts importants sur le recrutement et la viabilité des petites populations animales, comme celle du caribou forestier de Charlevoix. De plus, les routes peuvent affecter la survie autrement que par les collisions routières. Par exemple, de nombreuses études ont démontré qu'un réseau développé de routes forestières favorisait le loup gris, en lui permettant de patrouiller dans son territoire et de capturer ses proies plus efficacement (James et Stuart-Smith, 2000; Whittington et collab., 2011). Par ailleurs, les routes peuvent aussi nuire à la reproduction, en limitant les possibilités de rencontre entre les partenaires sexuels situés de part et d'autre des routes.

Il semblait essentiel de vérifier si les routes (non seulement la route 175, mais aussi le vaste réseau de chemins forestiers présent dans l'aire d'étude) avaient des impacts négatifs sur la performance individuelle des caribous forestiers. Ainsi, nous avons évalué les impacts des routes sur la survie, le succès reproducteur et les dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace chez le caribou forestier, soit trois indices liés à la valeur adaptative (*fitness*) des individus, et ce, à plusieurs échelles spatiales. Afin d'augmenter la taille de notre échantillon, nous avons utilisé les repérages télémétriques VHF provenant d'une étude sur le caribou forestier ayant eu lieu de 1999 à 2001 dans Charlevoix (R. Courtois, MRNF, données non publiées; tableau 21). De plus, une étude sœur portant sur le succès reproducteur des femelles caribous forestiers dans Charlevoix (Pinard et collab., 2012) a permis de recueillir des informations sur le statut reproducteur des femelles et la survie de leur veau entre 2004 et 2007. Les données provenant de ces deux études ont été comptabilisées et ajoutées à celles recueillies au cours de notre projet

de recherche afin d'obtenir les meilleurs indices possible de la performance individuelle des caribous forestiers au cours des 13 dernières années dans Charlevoix.

Tableau 21. Nombre de caribous forestiers de Charlevoix suivis par télémétrie VHF de 1999 à 2001 et inclus dans les analyses portant sur la relation entre la survie et la composition du domaine vital annuel des caribous forestiers de Charlevoix.

Année	Nombre d'individus suivis	Nombre d'individus femelles – mâles	Nombre de localisations télémétriques obtenues
1999	20	19 – 1	436
2000	23	22 – 1	528
2001	15	15 – 0	151
TOTAL	28	27 – 1	1 121

Nous avons bâti 10 modèles candidats composés des mêmes variables d'habitat que les analyses de sélection d'habitat présentées précédemment (à l'exception des variables de topographie), auxquelles nous avons ajouté l'âge des individus et l'âge au carré. Pour chaque analyse portant sur les différents indices de performance individuelle (survie, succès reproducteur et dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace), nous avons comparé le support des données empiriques pour ces 10 mêmes modèles avec le critère d'AIC_c (Burnham et Anderson, 2002). Ainsi, les sections suivantes présentent les résultats obtenus en utilisant les modèles les plus parcimonieux seulement.

9.1 Survie des caribous forestiers à large échelle

Nous avons d'abord examiné le lien entre la survie annuelle des caribous forestiers adultes et la densité des routes et des coupes forestières incluses dans leur domaine vital annuel. Pour ce faire, nous avons estimé des modèles de régression de Cox, qui nous ont permis de déterminer comment les variables d'habitat influent sur la survie annuelle des caribous forestiers (Heisey et Patterson, 2006). Pour ces analyses, seuls les individus morts par prédation ($n = 12$) ou de cause inconnue mais fort probablement liée à la prédation ($n = 15$) ont été considérés. Les animaux morts d'une autre cause (p. ex. mort

accidentelle; $n = 7$) ont été exclus des analyses. Le tableau 22 présente les données de survie annuelle des caribous forestiers pour les périodes 1999-2001 et 2004-2011, alors que le tableau 23 présente les résultats de l'analyse de survie annuelle réalisée sur les caribous forestiers adultes de Charlevoix.

Tableau 22. Nombre de caribous forestiers suivis par télémétrie VHF (1999-2001) ou GPS (2004-2011) dans Charlevoix, par année. Le nombre d'individus morts inclut toutes les causes de mortalité (prédation, naturelle, accidentelle ou inconnue). Les individus perdus étaient soit volontairement relâchés sans collier, soit équipés de colliers défectueux. La taille de la population a été estimée par des inventaires aériens (St-Laurent et Dussault, 2012).

Année	Individus suivis le 1 ^{er} janvier	Individus morts le 31 décembre	Individus perdus	Taille de la population
1999	20	4	0	95
2000	23	8	0	80
2004	17	2	1	70
2005	18	0	2	n. d.
2006	18	0	1	n. d.
2007	26	0	6	72
2008	30	2	1	83
2009	35	6	8	n. d.
2010	32	8	3	n. d.
2011	21	4	1	n. d.

Tableau 23. Coefficients de régression (β), indice de risque (*hazard ratio*) et intervalle de confiance à 95 % de l'indice de risque (IC 95 %) du modèle le plus parcimonieux expliquant la relation entre la survie annuelle et la composition du domaine vital annuel chez le caribou forestier de Charlevoix, de 1999 à 2011. Les cellules vides indiquent les variables d'habitat non retenues dans le modèle le plus parcimonieux.

Variable	Probabilité de survie		
	β	Indice de risque	IC 95 %
Âge (an)	-0,49	0,61	0,36:1,04
Âge ²	0,03	1,03	0,99:1,07
<i>Densité de routes ($km \times 10^1 / km^2$)</i>			
Routes actives	0,63	1,87	1,08:3,24
Chemins forestiers	-1,03	0,36	0,20:0,63
<i>Classes d'habitat (%)</i>			
Conifères matures ≥ 90 ans			
Milieux riches en lichen			
Milieux humides			
Décidus matures			
Perturbations ≤ 5 ans	0,12	1,13	1,06:1,21
Perturbations 6-20 ans			
Régénération > 20 ans			
Autres			

La probabilité de survie annuelle des caribous forestiers adultes est expliquée par un modèle incluant les variables d'âge, de densité de routes et de perturbations récentes. Selon ce modèle, la probabilité qu'un caribou forestier meure par prédation durant une année donnée augmentait avec la proportion des perturbations récentes et la densité des routes actives dans son domaine vital. Notamment, une augmentation de 0,25 km/km² de routes actives dans le domaine vital annuel d'un individu augmentait de 84 % le risque

que cet individu meure par prédation. Les résultats de cette analyse signifient que la probabilité de mourir par prédation durant l'année était beaucoup plus élevée pour les individus ayant établi leur domaine vital annuel dans des régions récemment aménagées par des activités de coupe forestière ou dans des régions où les densités de routes actives étaient élevées. Ainsi, les routes pourraient affecter la survie des caribous forestiers en facilitant leur capture par le loup gris (James et Stuart-Smith, 2000).

9.2 Survie des caribous forestiers à fine échelle

Nous avons réalisé des analyses de survie à fine échelle afin d'évaluer si la probabilité de mourir à court terme des caribous forestiers était influencée par la densité des routes dans un rayon beaucoup plus petit autour des localisations télémétriques. Nous avons réalisé cette analyse dans le but de décrire la sélection d'habitat des caribous forestiers juste avant leur capture par des prédateurs. Pour ce faire, nous avons comparé la sélection d'habitat des individus morts par prédation 15, 10 et 5 jours avant leur mort à la sélection d'habitat des individus vivants durant la même période. Nous avons utilisé une approche de rééchantillonnage aléatoire qui a permis de jumeler les individus morts ($n = 20$) aux individus vivants ($n = 39$; Dussault et collab., 2012). Ainsi, chaque individu mort était jumelé à un individu vivant au même moment, et le jumelage changeait à chaque itération. Nous avons répété le processus 1 000 fois pour chaque fenêtre temporelle (15, 10 et 5 jours). Après chaque itération, nous avons eu recours à une fonction de sélection des ressources afin de tester l'effet des variables d'habitat et de l'interaction entre ces variables et le statut de l'animal (soit vivant soit mort). Pour cette analyse à fine échelle spatiotemporelle, nous avons mesuré les caractéristiques de l'habitat et la densité des routes dans un rayon de 1 km autour des localisations télémétriques. Le tableau 24 présente les résultats de ces analyses.

Nous avons constaté que les trois fenêtres temporelles utilisées (15, 10 et 5 jours avant la mort des caribous forestiers) donnaient des résultats complémentaires. Les caribous forestiers qui ne sont pas morts évitaient les régions où les densités de routes étaient élevées, ainsi que les milieux en régénération, et ils sélectionnaient les perturbations récentes et les milieux humides (15 et 10 jours seulement). Toutefois, les individus morts

par prédation semblaient adopter un comportement différent. En effet, 15 jours avant leur mort, les caribous forestiers qui ont été tués par des prédateurs évitaient les peuplements de conifères matures. De plus, 10 jours avant leur mort, ces individus sélectionnaient les perturbations récentes davantage que les individus vivants. Les coupes forestières récentes peuvent engendrer une augmentation de la pression de prédation sur le caribou forestier, en raison de l'utilisation de ces habitats par les loups gris, qui y chassent les orignaux (Wittmer et collab., 2007). Les résultats de cette analyse à fine échelle démontrent que la sélection des coupes récentes par le caribou forestier est probablement un comportement maladapté, c'est-à-dire qui réduit la valeur adaptative des individus.

Tableau 24. Estimés des paramètres moyens (β) et intervalles de confiance à 90 % (IC 90 %) des modèles expliquant la sélection d'habitat à fine échelle des caribous forestiers de Charlevoix de 2004 à 2011. Ces modèles comparent la sélection d'habitat des individus morts par prédation 15, 10 et 5 jours avant leur mort à celle des individus vivants durant la même période. Les estimés de paramètres en effet simple représentent la sélection d'habitat des individus vivants, et les estimés de paramètres en interaction représentent la sélection d'habitat des individus morts par prédation.

Variable	15 jours		10 jours		5 jours	
	β	IC 90 %	β	IC 90 %	β	IC 90 %
<i>Statut (mort)^a</i>	0,17	-0,28:0,63	-0,13	-0,58:0,34	0,04	-0,51:0,60
<i>Densité de routes (km\times10⁴/km²)</i>						
Routes actives	-0,14	-0,23:-0,05	-0,16	-0,27:-0,07	-0,17	-0,30:-0,06
Chemins forestiers	-0,08	-0,12:-0,05	-0,08	-0,12:-0,05	-0,08	-0,12:-0,04
<i>Classes d'habitat (%)^b</i>						
Conifères matures \geq 90 ans	0,52	-0,04:1,11	0,46	-0,10:1,07	0,67	-0,02:1,36
Milieux humides	1,37	0,64:2,00	1,24	0,42:1,96	1,09	-0,06:2,00
Décidus matures	-3,43	-6,26:1,54	-3,56	-6,33:1,24	-4,09	-6,40:1,56
Perturbations \leq 5 ans	1,83	1,27:2,38	1,77	1,19:2,36	1,96	1,25:2,60
Perturbations 6-20 ans	0,01	-0,88:0,76	-0,10	-0,93:0,65	-0,06	-1,12:0,85
Régénération > 20 ans	-0,96	-1,80:-0,11	-1,03	-1,94:-0,22	-0,99	-1,96:-0,06
Autres	1,13	-0,58:2,34	0,99	-0,69:2,24	1,13	-0,80:2,45

<i>Interaction entre Statut et Densité de routes^d</i>						
Statut × Routes actives	0,01	-0,08:0,10	0,03	-0,06:0,14	0,07	-0,04:0,20
Statut × Chemins forestiers	-0,01	-0,04:0,02	-0,01	-0,04:0,03	-0,01	-0,04:0,03
<i>Interaction entre Statut et Classes d'habitat^a</i>						
Statut × Conifères matures ≥ 90 ans	-0,62	-1,20:-0,06	-0,39	-1,00:0,16	-0,42	-1,09:0,26
Statut × Milieux humides	0,41	-0,22:1,15	0,56	-0,17:1,38	0,66	-0,25:1,81
Statut × Décidus matures	-2,07	-7,06:0,75	-1,97	-6,82:0,78	-0,84	-6,35:1,44
Statut × Perturbations ≤ 5 ans	0,25	-0,30:0,81	0,64	0,05:1,20	0,51	-0,12:1,20
Statut × Perturbations 6-20 ans	0,04	-0,71:0,92	0,45	-0,30:1,28	-0,01	-0,93:1,06
Statut × Régénération > 20 ans	-1,16	-2,02:-0,32	-0,69	-1,48:0,22	-0,73	-1,65:0,24
Statut × Autres	-2,12	-3,32:-0,41	-2,60	-3,86:-0,90	-2,46	-3,77:-0,52

^a Catégorie de référence : Statut (vivant).

^b Catégorie de référence : Conifères matures 50-70 ans.

9.3 Succès reproducteur des femelles caribous forestiers à large échelle

Nous avons évalué si la présence de routes et de coupes forestières dans le domaine vital annuel des femelles caribous forestiers influait sur leur succès reproducteur. Nous avons employé deux indices du succès reproducteur, soit le taux de mise bas et la probabilité qu'une femelle adulte ayant mis bas voie son veau survivre à sa première année de vie. Nous avons évalué les impacts des variables d'habitat sur ces deux indices du succès reproducteur avec des régressions logistiques, en utilisant les données de Pinard et collab. (2012) de 2004 à 2007. Durant cette période, les femelles adultes suivies par télémétrie GPS ($n = 73$ femelles-années) ont donné naissance à 51 veaux caribous forestiers, dont seulement 21 (41 %) ont survécu à leur première année de vie.

Le taux de mise bas des femelles adultes était expliqué par un modèle incluant la densité de routes seulement, alors que la probabilité qu'un veau survive plus d'un an après sa naissance était expliquée par un modèle incluant les perturbations récentes seulement. Néanmoins, comme le démontre le tableau 25, aucune des variables incluses dans les modèles les plus parcimonieux n'avait un effet significatif sur le succès reproducteur des femelles. Le taux de mise bas et la mortalité des veaux n'étaient donc pas expliqués par la composition du domaine vital de leur mère. Cela pourrait être dû au fait que dans Charlevoix, les veaux sont surtout attaqués par des ours noirs (Pinard et collab., 2012), qui pourraient réagir au réseau routier différemment des loups gris (Berger, 2007). D'ailleurs, Dussault et collab. (2012) ont récemment démontré que les densités de routes élevées pouvaient influencer sur le succès reproducteur des femelles caribous forestiers durant les quelques semaines suivant la mise bas. Les routes pourraient donc avoir des impacts négatifs sur le succès reproducteur des femelles caribous forestiers à des échelles spatiotemporelles plus fines que celles qui ont été considérées au cours de cette étude, notamment à la période durant laquelle les veaux sont plus vulnérables à la prédation (voir Dussault et collab., 2012)

Tableau 25. Coefficients de régression (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) des modèles expliquant la relation entre la composition du domaine vital annuel et le succès reproducteur des femelles caribous forestiers de Charlevoix.

Variable	Taux de mise bas		Probabilité de survie du veau > 1 an après sa naissance	
	β	IC 95 %	β	IC 95 %
Âge			0,44	-0,85:1,72
Âge ²			-0,03	-0,12:0,06
<i>Densité de routes (km×10¹/km²)</i>				
Routes actives	0,68	-0,29:1,65	-0,12	-1,09:0,86
Chemins forestiers	0,03	-0,08:0,14	-0,02	-0,13:0,08
<i>Classes d'habitat (%)^a</i>				
Conifères matures ≥ 90 ans				
Milieux humides				
Décidus matures				
Perturbations ≤ 5 ans			-0,01	-0,11:0,08
Perturbations 6-20 ans				
Régénération > 20 ans				
Autres				

^a Catégorie de référence : Conifères matures 50-70 ans.

9.4 Dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace par les caribous forestiers à large échelle

Le dernier indice de performance individuelle que nous voulions évaluer était un indice des dépenses énergétiques. En effet, la valeur adaptative d'un individu n'est pas seulement liée à sa survie et à son succès reproducteur, mais aussi à la quantité d'énergie qu'il peut allouer à des activités comme la nutrition (Bergman et collab., 2001) ou la reproduction (Clutton-Brock et collab., 1989). Ainsi, nous avons évalué deux indices

indirects des dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace par les caribous forestiers, soit la superficie de leur domaine vital annuel (en km²) et leur taux de déplacement moyen (en m/h). Pour y arriver, nous avons réalisé deux régressions linéaires multiples en utilisant ces deux indices des dépenses énergétiques comme variables dépendantes et les variables d'habitat mesurées dans le domaine vital annuel des individus comme variables indépendantes.

La superficie du domaine vital annuel était expliquée par un modèle incluant les variables d'âge, de densité de routes et de classes d'habitat. Le tableau 26 montre que la superficie du domaine vital annuel augmentait avec la densité des routes et la proportion de la classe d'habitat « autre », et qu'elle diminuait avec la proportion des perturbations incluses dans le domaine vital des individus. Enfin, le taux de déplacement moyen des caribous forestiers était expliqué par un modèle incluant les variables d'âge et de densité de routes. Dans ce modèle, seule la densité de routes avait un effet significatif sur le taux de déplacement moyen. En effet, le taux de déplacement augmentait dans les régions où la densité de routes était élevée (tableau 26).

Les densités élevées de routes pourraient avoir influé sur la superficie des domaines vitaux annuels du caribou forestier en occasionnant une perte d'habitat fonctionnel et de la fragmentation d'une part, et en rendant certaines ressources inaccessibles d'autre part (Eigenbrod et collab., 2008). Les densités élevées de routes pourraient aussi obliger les individus à se déplacer davantage pour trouver des habitats favorables tout en évitant les risques accrus de prédation. De plus, l'augmentation du taux de déplacement moyen des caribous forestiers vivant dans des milieux où la densité de routes est élevée vient appuyer les résultats obtenus aux abords de la route 175. Les caribous forestiers pourraient réagir aux autres routes asphaltées et aux chemins forestiers en ajustant leur taux de déplacement, comme ils l'ont fait lors des traversées de la route 175.

Tableau 26. Coefficients de régression (β) et intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) des modèles expliquant la relation entre la composition du domaine vital annuel et les dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace par le caribou forestier de Charlevoix.

Variable	Superficie du domaine vital		Taux de déplacement moyen	
	β	IC 95 %	β	IC 95 %
Âge	0,05	-0,07:0,16	-0,05	-0,10: 0,01
Âge ²	<-0,01	-0,01:<0,01	<0,01	-0,01:0,01
<i>Densité de routes (km×10¹/km²)</i>				
Routes actives	0,98	0,76:1,19	0,17	0,09:0,26
Chemins forestiers	0,18	0,16:0,20	0,04	0,02:0,05
<i>Classes d'habitat (%)^a</i>				
Conifères matures ≥ 90 ans	-0,01	-0,03:<0,01		
Milieux humides	-0,01	-0,11:0,08		
Décidus matures	0,03	-0,04:0,10		
Perturbations ≤ 5 ans	-0,05	-0,07:-0,02	-0,01	-0,01:<0,01
Perturbations 6-20 ans	-0,07	-0,09:-0,05		
Régénération > 20 ans	0,02	-0,01:0,04		
Autres	0,08	0,01:0,15		

^a Catégorie de référence : Conifères matures 50–70 ans.

Les routes pourraient affecter le bilan énergétique des caribous forestiers de façon indirecte, en augmentant les dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace (p. ex. taux de déplacement plus élevés) ou en réduisant les intrants d'énergie (p. ex. moins de temps passé à se nourrir; Frid et Dill, 2002). Par exemple, Murphy et Curatolo (1987) ont observé que les caribous réduisaient leur acquisition de nourriture et démontraient davantage de comportements de vigilance à proximité des routes. Globalement, nos analyses démontrent que les routes ont affecté la performance individuelle des caribous

forestiers de Charlevoix, notamment en diminuant leur probabilité de survie et en augmentant leurs dépenses énergétiques liées à l'utilisation de l'espace.

10. Bilan

Cette section présente le bilan du projet de recherche. Nous y détaillons chacune des réalisations qui ont permis d'atteindre les objectifs que nous nous étions fixés au tout début du projet de recherche, dans le devis de suivi environnemental (ministère des Transports du Québec, 2006).

1. Déterminer les principaux facteurs spatiaux qui influent sur la probabilité qu'un segment de route soit traversé ou fréquenté par le caribou forestier.

Dès le début du projet de recherche, nous avons constaté que les caribous forestiers traversaient rarement la route. La création d'un modèle permettant de décrire les caractéristiques des segments de route les plus propices à une traversée de caribou forestier, semblable au modèle réalisé pour l'orignal (Dussault et collab., 2006), était donc impossible. Nous avons alors établi l'endroit où les caribous forestiers avaient effectué la majorité de leurs traversées de la route 175 au cours de l'étude (voir la section 6). Nous avons aussi intégré plusieurs facteurs spatiaux dans nos analyses, afin de bien décrire la sélection d'habitat du caribou forestier. Ainsi, le type de végétation, la topographie, les chemins forestiers et les lignes de transport d'énergie ont tous été inclus comme covariables dans nos modèles de sélection d'habitat. Les caractéristiques de la route 175 et de son emprise ont aussi été considérées indirectement grâce aux analyses réalisées dans les zones d'effet entourant la route 175 (voir la figure 4), dans lesquelles nous considérons les interactions entre chaque variable d'habitat et le statut d'avancement des travaux de réfection.

Les mares salines avaient été incluses dans le devis de suivi environnemental puisqu'elles étaient reconnues comme des sites à risque élevé d'accident routier avec l'orignal (Dussault et collab., 2006). Toutefois, les caribous forestiers évitaient les routes

davantage que l'original, et nous n'avons détecté aucun signe que les caribous forestiers utilisaient les mares salines en bordure des routes. De plus, la réfection de la route 175 a permis d'éliminer les mares salines qui s'y trouvaient.

Considérer les mesures d'atténuation des accidents routiers le long de la route 175 a posé un problème particulier dans cette étude. En effet, des sections de clôtures anticervidés ont été érigées de part et d'autre de la route 175 en cours de projet, mais nous ne possédions pas de données assez précises pour prendre en compte leurs impacts sur les déplacements du caribou forestier. L'érection des clôtures se faisait souvent plusieurs mois après la réfection de la route, et de façon très variable d'un entrepreneur à l'autre. Certaines clôtures ont été érigées en sections, d'autres étaient installées par étapes (p. ex. pose des poteaux) et n'étaient pas fonctionnelles dès le début. D'autres encore pouvaient être érigées sans qu'aucune information fiable ne nous permette de le savoir. Les impacts potentiels des clôtures anticervidés se sont donc fondus avec les impacts généraux de la route 175. Il est tout de même nécessaire de préciser que le principal secteur utilisé par les caribous forestiers pour traverser la route 175 (bornes kilométriques 115 à 125) ne comportait aucune mesure d'atténuation des accidents routiers.

2. Déterminer les principaux facteurs temporels qui influent sur le comportement du caribou forestier.

Nous avons divisé chaque année en périodes représentatives de la biologie du caribou forestier, et nous nous sommes servis de ces périodes pour faire des analyses saisonnières. Bien que nous n'ayons pas étudié précisément la phénologie annuelle des plantes dans l'aire d'étude, ces différentes périodes nous ont permis de considérer les principaux changements saisonniers, tout en intégrant le comportement du caribou forestier. Nous avons aussi créé un indice de trafic considérant les différences de trafic selon l'heure, le jour de la semaine et le mois (voir la section 7).

3. *Déterminer les changements dans les patrons de déplacement des caribous forestiers à la suite des modifications de la route 175.*

La section 5.4 a permis de décrire les patrons de déplacement les plus communs dans la population de caribous forestiers de Charlevoix entre 2004 et 2011. Tout au long du projet, nous avons pris soin de comparer le comportement des caribous forestiers avant et après la réfection de la route 175, et avons constaté que le nombre de traversées de la route avait montré une tendance à diminuer avec les années. Nous avons aussi observé que seulement 13 des 59 caribous forestiers suivis traversaient la route 175. Ces individus ont traversé la route avant, pendant et après les travaux de réfection, et l'emplacement où avaient lieu la majorité de ces traversées est demeuré le même. Certains de ces individus ont toutefois utilisé l'emprise des lignes de transport d'énergie à proximité de la route 175 plutôt que celle de la route en tant que telle.

4. *Étudier la probabilité de survie des caribous forestiers en fonction des caractéristiques de leur domaine vital en matière d'habitat et de la présence de prédateurs, de routes et autres perturbations anthropiques.*

Nous avons développé ce thème exhaustivement dans la section 9, où nous avons étudié les impacts des routes et des coupes forestières incluses dans le domaine vital des caribous forestiers sur leur probabilité de mourir par prédation. Nous avons aussi rédigé un article scientifique pour répondre tout spécialement à cette question (Leblond et collab., 2013b).

5. *Déterminer les principales périodes d'activité du caribou forestier près des routes et dans l'emprise des lignes de transport d'énergie.*

Les routes, qu'elles soient asphaltées ou non, étaient évitées par les caribous forestiers à toutes les échelles auxquelles nous avons analysé leur comportement de sélection d'habitat. Les quelques fois où les caribous forestiers ont traversé la route 175 au cours des huit années qu'a duré l'étude, ils l'ont fait à des moments de l'année ou de la journée très variables (voir la section 6.2), qui ne semblaient pas correspondre à des moments où le trafic était moins dense. Globalement, les caribous forestiers ont aussi évité les lignes

de transport d'énergie. Cependant, une particularité propre aux lignes de transport d'énergie est que leur emprise a été utilisée de façon disproportionnée par quelques individus. Ces individus « particuliers » étaient retrouvés sous les lignes de transport d'énergie en tout temps, hiver comme été, le jour comme la nuit.

6. Déterminer le moment de l'année et l'heure du jour où les risques d'accident avec le caribou forestier sont plus élevés.

Au cours de l'étude, au moins trois caribous forestiers ont été impliqués dans un accident routier sur la route 175, mais aucun de ces individus n'était porteur d'un collier GPS. Il semble que le comportement d'évitement des routes par le caribou forestier lui confère une certaine protection contre les mortalités directes sur les routes. En ce sens, le caribou forestier ne semble pas représenter un problème de sécurité routière, contrairement à l'orignal, qui est présent en densité beaucoup plus élevée et qui traverse la route 175 plus fréquemment (Laurian et collab., 2008).

7. Suivre certaines mesures prises concernant la gestion de la circulation de l'orignal dans les corridors routiers, à savoir l'utilisation des passages à grande faune et l'utilisation des sorties d'urgence afin d'assurer le retour des orignaux qui se sont introduits dans la zone clôturée vers la forêt.

Le suivi des signes de présence de l'orignal dans l'emprise de la route 175 et près des structures servant à diminuer les risques de collision routière a fait l'objet d'un projet connexe, confié à la firme AECOM. Le rapport d'AECOM (2011) décrit les résultats des suivis de pistes et des suivis photographiques réalisés pour mesurer l'utilisation par l'orignal des zones clôturées, des passages à faune et des sorties d'urgence.

8. *Voir à la diffusion des résultats par la participation à des colloques et conférences internationales sur le sujet et voir à l'organisation d'un colloque où serait présenté l'essentiel des résultats et où des spécialistes de l'étranger viendraient partager leur expérience dans le domaine des interactions entre la faune et les routes.*

La plupart des résultats présentés dans ce rapport final ont nécessité des analyses très spécialisées et ont été publiés dans des journaux scientifiques de réputation internationale (Leblond et collab., 2011; Leblond et collab., 2013a, b). Ces articles scientifiques sont annexés à la fin du document dans leur version originale (annexes A, B et C). Les résultats de ce projet de recherche ont aussi été présentés dans divers congrès, dont un colloque international organisé par le MTQ, le MRNF, l'UQAR et l'Université Concordia. Ce colloque, intitulé « Routes et faune terrestre : de la science aux solutions », s'est tenu dans la ville de Québec du 24 au 27 mai 2011 et a attiré plus de 120 participants venant de différents horizons. Des chercheurs de diverses universités québécoises et canadiennes, des gestionnaires de la faune et des transports, des consultants ainsi que des professionnels travaillant pour des organismes environnementaux se sont donné rendez-vous pour discuter des problématiques fauniques liées aux routes. Cet événement a permis de présenter les avancées en matière d'écologie routière au Québec, en utilisant comme exemple principal le projet de recherche entourant la réfection de la route 175. La programmation complète de ce colloque est présentée à l'annexe D.

De plus, les actes de ce colloque ont été publiés sous la forme d'un numéro spécial du *Naturaliste canadien* (vol. 136, n° 2, printemps 2012), une publication officielle de la Société Provancher (<http://www.provancher.qc.ca>) qui constitue l'une des plus anciennes revues scientifiques de langue française au Canada. Une copie des actes du colloque a été transmise à chaque personne présente lors de l'événement. Ce numéro spécial comprenait un article traitant précisément des résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche sur le caribou forestier de Charlevoix (Leblond et collab., 2012). Cet article est aussi annexé à la fin du document dans sa version originale (annexe E). Ainsi, nous avons tout mis en œuvre pour que les résultats obtenus au cours de ce projet de recherche soient

diffusés et accessibles, autant pour les gestionnaires travaillant dans les différents ministères provinciaux que pour les chercheurs internationaux.

11. Conclusion et recommandations

La présente étude avait pour objectif d'évaluer les principaux impacts de la réfection de la route 175 sur le comportement et la survie du caribou forestier de Charlevoix. Ce projet de recherche a permis d'établir que la route 175 exerçait déjà une influence sur le comportement du caribou forestier avant son élargissement. Toutefois, les travaux de réfection ont amplifié les réactions du caribou forestier par rapport à la route 175. Les routes ont affecté négativement plusieurs facettes du comportement des caribous forestiers, dont leur sélection d'habitat, leur utilisation de l'espace et leurs déplacements. Le réseau routier et les coupes forestières ont aussi porté atteinte à la survie des caribous forestiers en augmentant la probabilité qu'ils soient capturés par un prédateur. Les routes en général, et le projet de réfection de la route 175 en particulier, ont donc entraîné des impacts négatifs pour le caribou forestier de Charlevoix.

L'étude des impacts des routes sur la flore et la faune est un domaine de recherche relativement récent (Forman, 1998) et les travaux réalisés en écologie routière n'ont pas encore eu beaucoup de répercussions sur la planification du réseau routier (Roedenbeck et collab., 2007). La conservation des espèces menacées est fréquemment mise en opposition avec les besoins des autres utilisateurs des ressources et du territoire, ce qui mène souvent à une inadéquation entre les stratégies de conservation proposées et les actions déployées. Néanmoins, l'élaboration de ce projet de recherche, basé sur des assises scientifiques solides, était la meilleure façon d'obtenir les connaissances nécessaires à la prise de décisions de gestion éclairées quant à la conservation du caribou forestier. Les résultats de cette étude démontrent que le caribou forestier de Charlevoix évolue dans un paysage profondément modifié par les activités humaines, et qu'il réagit à la présence des routes, qu'elles soient asphaltées ou non, ainsi qu'à la présence des coupes forestières. Ces perturbations humaines font désormais partie du paysage dans

lequel les caribous forestiers évoluent. Bien qu'il soit impossible d'éliminer leurs impacts, des mesures d'atténuation appropriées pourraient les réduire considérablement.

Les résultats de cette étude nous permettent de formuler des recommandations pour favoriser le maintien du caribou forestier dans Charlevoix. D'abord, il est essentiel de maintenir un habitat de qualité pour le caribou forestier, par l'adoption de modalités d'aménagement forestier adaptées. Notamment, la protection de blocs de forêt mature est essentielle pour permettre au caribou forestier de retrouver le lichen, mais aussi la quiétude dont il semble avoir besoin. Le maintien des forêts de conifères matures pourrait aussi lui permettre de s'isoler de son principal prédateur, le loup gris.

Ensuite, il est essentiel de maintenir et même d'améliorer la connectivité au sein de l'aire de répartition du caribou forestier. Il faut éviter que la route 175 subdivise la population actuelle en deux entités plus petites, chacune beaucoup plus fragile. Afin de maintenir cette connectivité, il faudrait permettre aux caribous forestiers de traverser la route de façon sécuritaire, particulièrement aux endroits où ils la traversent le plus souvent. Les résultats de cette étude indiquent qu'un passage faunique situé entre les kilomètres 115 et 125 favoriserait le maintien de la connectivité au sein de l'aire de répartition du caribou forestier de Charlevoix. En outre, il est reconnu que, pour être efficaces, les passages fauniques doivent être utilisés conjointement avec des clôtures anticervidés (Clevenger et Waltho, 2005). Or, il n'y a pas ni clôture ni passage faunique dans le principal secteur utilisé par le caribou forestier pour traverser la route 175. Si les caribous forestiers peuvent ainsi traverser la route 175 dans ce secteur (étant donné que la connectivité n'est pas entravée par une clôture), le risque qu'un individu soit impliqué dans une collision routière demeure élevé.

Pour ces raisons, nous recommandons l'installation d'une clôture anticervidés et d'un passage faunique dans le secteur situé entre les kilomètres 115 et 125, afin de faciliter les déplacements du caribou forestier de part et d'autre de la route 175. Ces aménagements permettraient de maintenir ou d'améliorer la connectivité entre les deux côtés de la route, tout en réduisant considérablement les risques de collision routière. Cette solution

améliorerait du même coup la sécurité des automobilistes dans ce secteur, où il existe un problème persistant de collisions impliquant l'original.

Après discussions avec le responsable du projet de recherche sur les impacts de la route 175 pour la grande faune au MTQ (Y. Bédard), nous concluons qu'il serait judicieux de prolonger la clôture anticervidés, qui se termine actuellement au kilomètre 110, jusqu'au kilomètre 128, où un passage faunique est déjà aménagé sous le pont de la rivière Jacques-Cartier et où deux sections de clôture de 500 m sont déjà érigées. Enfin, entre les kilomètres 115 et 125, un passage faunique de type supérieur pourrait être construit à l'endroit le plus propice pour le caribou forestier, sans négliger les contraintes techniques et environnementales. Notamment, il semble que la topographie dans ce secteur (un fond de vallée) empêche la construction d'un passage faunique sous la route (Y. Bédard, MTQ, communication personnelle).

Au cours des dernières décennies, les activités humaines ont profondément modifié l'habitat du caribou, ce qui a mené à son déclin à l'échelle mondiale (Vors et Boyce, 2009). Par la création et l'application de plans de rétablissement, les agences de conservation canadiennes et québécoises tentent de protéger le caribou forestier en limitant les mortalités directes (p. ex. en interdisant la chasse) et en préservant son habitat critique (Festa-Bianchet et collab., 2011). Cette étude démontre que la conservation du caribou forestier doit aussi passer par l'atténuation des impacts indirects occasionnés par les infrastructures anthropiques, dont les routes sont un des exemples les plus éloquents.

12. Références

- Aarts, G., M. MacKenzie, B. McConnell, M. Fedak et J. Matthiopoulos. 2008. « Estimating space-use and habitat preference from wildlife telemetry data ». *Ecography*, vol. 31, n° 1, p. 140-160.
- AECOM. 2011. *Suivi environnemental du projet d'amélioration de la route 175 à quatre voies divisées. Grande faune 2010 – Efficacité des aménagements pour la grande faune*. Québec, 43 p. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, à l'Université du Québec à Rimouski et au ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
- Anderson, D. P., J. D. Forester, M. G. Turner, J. L. Frair, E. H. Merrill, D. Fortin, J. S. Mao et M. S. Boyce. 2005. « Factors influencing female home range sizes in elk (*Cervus elaphus*) in North American landscapes ». *Landscape Ecology*, vol. 20, n° 3, p. 257-271.
- Banville, D. 1998. *Plan de gestion du caribou de Charlevoix*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction régionale de Québec, 26 p.
- Bédard, Y. 2012. « La réfection de l'axe routier 73/175 : son histoire, son déroulement et ses enjeux sociaux et écologiques ». *Le Naturaliste canadien*, vol. 136, n° 2, p. 3-7.
- Berger, J. 2007. « Fear, human shields and the redistribution of prey and predators in protected areas ». *Biology Letters*, vol. 3, n° 6, p. 620-623.

- Bergman, C. M., J. M. Fryxell, C. C. Gates et D. Fortin. 2001. « Ungulate foraging strategies: energy maximizing or time minimizing? ». *Journal of Animal Ecology*, vol. 70, n° 2, p. 289-300.
- Block, W. M. et L. A. Brennan. 1993. « The habitat concept in ornithology: theory and applications ». In Power, D. M. (dir.). *Current Ornithology*. New York, Plenum Press, p. 35-91.
- Bowman, J., J. C. Ray, A. J. Magoun, D. S. Johnson et F. N. Dawson. 2010. « Roads, logging, and the large-mammal community of an eastern Canadian boreal forest ». *Canadian Journal of Zoology*, vol. 88, n° 5, p. 454-467.
- Boyce, M. S., P. R. Vernier, S. E. Nielsen et F. K. A. Schmiegelow. 2002. « Evaluating resource selection functions ». *Ecological Modelling*, vol. 157, n° 2-3, p. 281-300.
- Burnham, K. P. et D. R. Anderson. 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*, 2^e éd., New York, Springer-Verlag, 488 p.
- Charbonneau, J.-A. 2011. *Sélection des milieux ouverts par le caribou forestier de Charlevoix, Québec : compromis entre risque de prédation et ressources alimentaires*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 72 p.
- Clevenger, A. P. et N. Waltho. 2005. « Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals ». *Biological Conservation*, vol. 121, n° 3, p. 453-464.
- Clutton-Brock, T. H., S. D. Albon et F. E. Guinness. 1989. « Fitness costs of gestation and lactation in wild mammals ». *Nature*, vol. 337, n° 6204, p. 260-262.

- Courbin, N., D. Fortin, C. Dussault et R. Courtois. 2009. « Landscape management for woodland caribou: the protection of forest blocks influences wolf-caribou co-occurrence ». *Landscape Ecology*, vol. 24, n° 10, p. 1375-1388.
- Courtois, R. 2003. *La conservation du caribou forestier dans un contexte de perte d'habitat et de fragmentation du milieu*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, 350 p.
- Dahle, B., E. Reimers et J. E. Colman. 2008. « Reindeer (*Rangifer tarandus*) avoidance of a highway as revealed by lichen measurements ». *European Journal of Wildlife Research*, vol. 54, n° 1, p. 27-35.
- Dennis, R. L. H., T. G. Shreeve et H. Van Dyck. 2003. « Towards a functional resource-based concept for habitat: a butterfly biology viewpoint ». *Oikos*, vol. 102, n° 2, p. 417-426.
- Desautels, R., R. Després, F. Dufresne, S. Leblanc, L. Méthot, Y. Provencher, G. Rochette, B. Sénécal et C. Warren. 2009. « Voirie forestière ». In *Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (dir.), Manuel de foresterie*, 2^e éd., Québec, Éditions Multimondes, p. 1187-1244. .
- Dussault, C., J.-P. Ouellet, C. Laurian, R. Courtois, M. Poulin et L. Breton. 2007. « Moose movement rates along highways and crossing probability models ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 71, n° 7, p. 2338-2345.
- Dussault, C., M. Poulin, R. Courtois et J.-P. Ouellet. 2006. « Temporal and spatial distribution of moose-vehicle accidents in the Laurentides Wildlife Reserve, Quebec, Canada ». *Wildlife Biology*, vol. 12, n° 4, p. 415-425.
- Dussault, C., V. Pinard, J.-P. Ouellet, R. Courtois et D. Fortin. 2012. « Avoidance of roads and selection for recent cutovers by threatened caribou: fitness-rewarding or

- maladaptive behavior? ». *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, vol. 279, n° 1746, p. 4481-4488.
- Dyer, S. J., J. P. O'Neill, S. M. Wasel et S. Boutin. 2001. « Avoidance of industrial development by woodland caribou ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 65, n° 3, p. 531-542.
- Dyer, S. J., J. P. O'Neill, S. M. Wasel et S. Boutin. 2002. « Quantifying barrier effects of roads and seismic lines on movements of female woodland caribou in northeastern Alberta ». *Canadian Journal of Zoology*, vol. 80, n° 5, p. 839-845.
- Eigenbrod, F., S. J. Hecnar et L. Fahrig. 2008. « Accessible habitat: an improved measure of the effects of habitat loss and roads on wildlife populations ». *Landscape Ecology*, vol. 23, n° 2, p. 159-168.
- Festa-Bianchet, M., J. C. Ray, S. Boutin, S. Côté et A. Gunn. 2011. « Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future ». *Canadian Journal of Zoology*, vol. 89, n° 5, p. 419-434.
- Foley, P. 1994. « Predicting extinction times from environmental stochasticity and carrying-capacity ». *Conservation Biology*, vol. 8, n° 1, p. 124-137.
- Forman, R. T. T. 1998. « Road ecology: a solution for the giant embracing us ». *Landscape Ecology*, vol. 13, n° 4, p. iii-v.
- Forman, R. T. T. 2000. « Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States ». *Conservation Biology*, vol. 14, n° 1, p. 31-35.
- Frid, A. et L. Dill. 2002. « Human-caused disturbance stimuli as a form of predation risk ». *Conservation Ecology*, vol. 6, n° 1.

- Gagnon, J. W., T. C. Theimer, N. L. Dodd, S. Boe et R. E. Schweinsburg. 2007. « Traffic volume alters elk distribution and highway crossings in Arizona ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 71, n° 7, p. 2318-2323.
- Garshelis, D. L. 2000. « Delusions in habitat evaluation: measuring use, selection, and importance ». In Boitani, L. et T. Fuller (dir.). *Research techniques in animal ecology: controversies and consequences*. New York, Columbia University Press, p. 111-163.
- Gillies, C. S., M. Hebblewhite, S. E. Nielsen, M. A. Krawchuk, C. L. Aldridge, J. L. Frair, D. J. Saher, C. E. Stevens et C. L. Jerde. 2006. « Application of random effects to the study of resource selection by animals ». *Journal of Animal Ecology*, vol. 75, n° 4, p. 887-898.
- Gill, J. A., K. Norris et W. J. Sutherland. 2001. « Why behavioural responses may not reflect the population consequences of human disturbance ». *Biological Conservation*, vol. 97, n° 2, p. 265-268.
- Graham, M. H. 2003. « Confronting multicollinearity in ecological multiple regression ». *Ecology*, vol. 84, n° 11, p. 2809-2815.
- Gustine, D. D., K. L. Parker, R. J. Lay, M. P. Gillingham et D. C. Heard. 2006. « Calf survival of woodland caribou in a multi-predator ecosystem ». *Wildlife Monographs*, n° 165, p. 1-32.
- Heisey, D. M. et B. R. Patterson. 2006. « A review of methods to estimate cause-specific mortality in presence of competing risks ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 70, n° 6, p. 1544-1555.
- Hewison, A. J. M., J. P. Vincent, J. M. Angibault, D. Delorme, G. Van Laere et J.-M. Gaillard. 1999. « Tests of estimation of age from tooth wear on roe deer of

known age: variation within and among populations ». *Canadian Journal of Zoology*, vol. 77, n° 1, p. 58-67.

Jaeger, J. A. G., J. Bowman, J. Brennan, L. Fahrig, D. Bert, J. Bouchard, N. Charbonneau, K. Frank, B. Gruber et K. T. von Toschanowitz. 2005. « Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior ». *Ecological Modelling*, vol. 185, n°s 2-4, p. 329-348.

James, A. R. C. et A. K. Stuart-Smith. 2000. « Distribution of caribou and wolves in relation to linear corridors ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 64, n° 1, p. 154-159.

Jolicœur, H. 1993. *Des caribous et des hommes : l'histoire de la réintroduction du caribou dans les Grands Jardins : 1963 à 1973*, Québec, ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 76 p.

Laurian, C., C. Dussault, J.-P. Ouellet, R. Courtois, M. Poulin et L. Breton. 2008. « Behavior of moose relative to a road network ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 72, n° 7, p. 1550-1557.

Leblond, M., C. Dussault et J.-P. Ouellet. 2012. « Réponses comportementales du caribou forestier à l'élargissement d'un axe routier majeur ». *Le Naturaliste canadien*, vol. 136, n° 2, p. 22-28.

Leblond, M., C. Dussault et J.-P. Ouellet. 2013a. « Avoidance of roads by large herbivores and its relation to disturbance intensity ». *Journal of Zoology*, vol. 289, p. 32-40.

Leblond, M., C. Dussault et J.-P. Ouellet. 2013b. « Impacts of human disturbance on large prey species: do behavioural reactions translate to fitness consequences? ». *Plos One*, vol.8, n° 9, e73695.

- Leblond, M., J. Frair, D. Fortin, C. Dussault, J.-P. Ouellet et R. Courtois. 2011. « Assessing the influence of resource covariates at multiple spatial scales: an application to forest-dwelling caribou faced with intensive human activity ». *Landscape Ecology*, vol. 26, n° 10, p. 1433-1446.
- Mahoney, S. P. et J. A. Schaefer. 2002. « Hydroelectric development and the disruption of migration in caribou ». *Biological Conservation*, vol. 107, n° 2, p. 147-153.
- Main, M. B. 2008. « Reconciling competing ecological explanations for sexual segregation in ungulates ». *Ecology*, vol. 89, n° 3, p. 693-704.
- Manly, B. F. J., L. L. McDonald, D. L. Thomas, T. L. McDonald et W. P. Erickson. 2002. *Resource selection by animals: statistical design and analysis for field studies*, 2^e éd., Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 221 p.
- Millsbaugh, J. J., J. R. Skalski, B. J. Kernohan, K. J. Raedeke, G. C. Brundige et A. B. Cooper. 1998. « Some comments on spatial independence in studies of resource selection ». *Wildlife Society Bulletin*, vol. 26, n° 2, p. 232-236.
- Ministère des Transports du Québec. 2006. *Devis de suivi environnemental – Évaluation de l’impact du projet de réfection de l’axe routier 73/175 sur la grande faune, soit le caribou forestier et l’orignal*. Direction de la Capitale-Nationale et Direction du Saguenay–Lac-Saint-Jean–Chibougamau, 8 p.
- Mohr, C. O. 1947. « Table of equivalent populations in North American mammals ». *American Midland Naturalist*, vol. 37, p. 223-249.
- Morrison, M. L. 2001. « Invited paper: A proposed research emphasis to overcome the limits of wildlife-habitat relationship studies ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 65, n° 4, p. 613-623.

- Murphy, S. M. et J. A. Curatolo. 1987. « Activity budgets and movement rates of caribou encountering pipelines, roads, and traffic in northern Alaska ». *Canadian Journal of Zoology*, vol. 65, n° 10, p. 2483-2490.
- Nellemann, C., I. Vistnes, P. Jordhøy, O. Strand et A. Newton. 2003. « Progressive impact of piecemeal infrastructure development on wild reindeer ». *Biological Conservation*, vol. 113, n° 2, p. 307-317.
- Olden, J. D., R. L. Schooley, J. B. Monroe et N. L. Poff. 2004. « Context-dependent perceptual ranges and their relevance to animal movements in landscapes ». *Journal of Animal Ecology*, vol. 73, n° 6, p. 1190-1194.
- Pinard, V., C. Dussault, J.-P. Ouellet, D. Fortin et R. Courtois. 2012. « Calving rate, calf survival rate, and habitat selection of forest-dwelling caribou in a highly managed landscape ». *Journal of Wildlife Management*, vol. 76, n° 1, p. 189-199.
- Polfus, J. L., M. Hebblewhite et K. Heinemeyer. 2011. « Identifying indirect habitat loss and avoidance of human infrastructure by northern mountain woodland caribou ». *Biological Conservation*, vol. 144, n° 11, p. 2637-2646.
- Potvin, F. et L. Breton. 1988. « Use of a net gun for capturing white-tailed deer, *Odocoileus virginianus*, on Anticosti Island, Québec ». *Canadian Field-Naturalist*, vol. 102, n° 4, p. 697-700.
- Rettie, W. J. et F. Messier. 2000. « Hierarchical habitat selection by woodland caribou: its relationship to limiting factors ». *Ecography*, vol. 23, n° 4, p. 466-478.
- Roedenbeck, I. A., L. Fahrig, C. S. Findlay, J. E. Houlahan, J. A. G. Jaeger, N. Klar, S. Kramer-Schadt et E. A. van der Grift. 2007. « The Rauschholzhausen agenda for road ecology ». *Ecology and Society*, vol. 12, n° 1.

- Schwarz, G. 1978. « Estimating the dimension of a model ». *Annals of Statistics*, vol. 6, n° 2, p. 461-464.
- Sebbane, A., R. Courtois, L. St-Onge, L. Breton et P.-É. Lafleur. 2002. *Utilisation de l'espace et caractérisation de l'habitat du caribou de Charlevoix, entre l'automne 1998 et l'hiver 2001*, Québec, Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune, 60 p.
- St-Laurent, M.-H. et C. Dussault. 2012. « The reintroduction of boreal caribou as a conservation strategy: a long-term assessment at the southern range limit ». *Rangifer, Special Issue*, vol. 32, n° 2, p. 127-138.
- Vors, L. S. et M. S. Boyce. 2009. « Global declines of caribou and reindeer ». *Global Change Biology*, vol. 15, n° 11, p. 2626-2633.
- Whittington, J., M. Hebblewhite, N. J. DeCesare, L. Neufeld, M. Bradley, J. Wilmshurst et M. Musiani. 2011. « Caribou encounters with wolves increase near roads and trails: a time-to-event approach ». *Journal of Applied Ecology*, vol. 48, n° 6, p. 1535-1542.
- Wittmer, H. U., B. N. McLellan, R. Serrouya et C. D. Apps. 2007. « Changes in landscape composition influence the decline of a threatened woodland caribou population ». *Journal of Animal Ecology*, vol. 76, n° 3, p. 568-579.

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 