

Évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation des accidents routiers impliquant l'orignal par la modélisation individu-centrée

Paul D. Grosman, Jochen A. G. Jaeger, Pascale M. Biron, Christian Dussault et Jean-Pierre Ouellet

Routes et faune terrestre : de la science aux solutions
Volume 136, numéro 2, printemps 2012

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1009101ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1009101ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (imprimé)

1929-3208 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Grosman, P. D., Jaeger, J. A. G., Biron, P. M., Dussault, C. & Ouellet, J.-P. (2012). Évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation des accidents routiers impliquant l'orignal par la modélisation individu-centrée. *Le Naturaliste canadien*, 136 (2), 16–21. <https://doi.org/10.7202/1009101ar>

Résumé de l'article

Les collisions routières impliquant l'orignal se produisent souvent à proximité des mares d'eau stagnante où se concentre le sel de déglaceage qui a une forte teneur en sodium, un élément qui attire les orignaux. Cette étude vise à évaluer l'efficacité du drainage de ces mares salines et de l'implantation de mares salines compensatoires comme mesure d'atténuation des collisions routières impliquant l'orignal. Une approche de modélisation individu-centrée a été utilisée pour prédire le comportement des orignaux en relation avec divers scénarios de gestion des mares salines le long de la route 175 au Québec. Le suivi télémétrique de 47 orignaux a permis de calibrer et valider le modèle. Les résultats suggèrent que l'élimination de toutes les mares salines se traduirait par une réduction de 79 % des traversées de la route par les orignaux. L'érection de clôtures munies de passages fauniques est une autre méthode reconnue pour réduire le risque de collisions, mais nous ne connaissons pas l'influence de l'espacement entre les passages fauniques sur la perméabilité de la route dans les secteurs clôturés. Nous proposons un cadre conceptuel pour modéliser l'impact de la distance entre les passages fauniques le long de la route 175 sur la perméabilité de la route aux déplacements des orignaux.

Évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation des accidents routiers impliquant l'orignal par la modélisation individu-centrée

Paul D. Grosman, Jochen A.G. Jaeger, Pascale M. Biron,
Christian Dussault et Jean-Pierre Ouellet

Résumé

Les collisions routières impliquant l'orignal se produisent souvent à proximité des mares d'eau stagnante où se concentre le sel de déglçage qui a une forte teneur en sodium, un élément qui attire les orignaux. Cette étude vise à évaluer l'efficacité du drainage de ces mares salines et de l'implantation de mares salines compensatoires comme mesure d'atténuation des collisions routières impliquant l'orignal. Une approche de modélisation individu-centrée a été utilisée pour prédire le comportement des orignaux en relation avec divers scénarios de gestion des mares salines le long de la route 175 au Québec. Le suivi télémétrique de 47 orignaux a permis de calibrer et valider le modèle. Les résultats suggèrent que l'élimination de toutes les mares salines se traduirait par une réduction de 79 % des traversées de la route par les orignaux. L'érection de clôtures munies de passages fauniques est une autre méthode reconnue pour réduire le risque de collisions, mais nous ne connaissons pas l'influence de l'espacement entre les passages fauniques sur la perméabilité de la route dans les secteurs clôturés. Nous proposons un cadre conceptuel pour modéliser l'impact de la distance entre les passages fauniques le long de la route 175 sur la perméabilité de la route aux déplacements des orignaux.

MOTS CLÉS : accidents routiers, cervidés, mares salines, passages fauniques, routes

Introduction

Les routes ont des impacts majeurs sur les populations fauniques car elles fragmentent leur habitat et elles sont le théâtre d'accidents routiers (Jaeger et collab., 2005; Fahrig et Rytwinski, 2009). Dans le cas de l'orignal (*Alces alces*), les accidents routiers sont souvent associés à la présence de mares salines à proximité des routes. Ces mares sont formées à la suite de l'accumulation du sel de déglçage utilisé sur les routes en hiver. Les orignaux sont attirés par les mares salines car elles ont une teneur élevée en sodium, un élément rare dans la forêt boréale, mais essentiel à plusieurs fonctions physiologiques (Botkin et collab., 1973). Les orignaux fréquentent les mares salines pour se procurer le sodium dont ils ont besoin, ce qui augmente le risque de collision de 80 % en périphérie de celles-ci (Dussault et collab., 2006a). À titre indicatif, plus de 100 tonnes métriques de sel sont annuellement répandues sur chaque kilomètre de la route 175 dans la réserve faunique des Laurentides (Jolicoeur et Crête, 1994).

Plusieurs mesures d'atténuation des accidents routiers impliquant l'orignal ont été utilisées par le passé, par exemple le drainage des mares salines au bord des routes ou l'implantation de mares salines compensatoires destinées à attirer les orignaux loin de la route (Leblond et collab., 2007b). La méthode la plus efficace semble toutefois être l'installation de clôtures de chaque côté de la route (Clevenger et collab., 2001; Dodd et collab., 2007). Cependant, ces clôtures fragmentent l'habitat et des passages fauniques doivent être construits le long de celles-ci pour maintenir une certaine connectivité entre les 2 côtés de la route (Clevenger et collab., 2001; Gagnon et collab., 2011). L'emplacement des passages fauniques est souvent basé sur des facteurs environnementaux, principalement la présence

d'une rivière et la proximité de zones à forte probabilité de collision routière (Bissonette et Adair, 2008). L'influence de l'espacement entre les passages sur la connectivité du paysage et la perméabilité des routes n'a pas reçu beaucoup d'attention. Idéalement, l'espacement entre ces structures devrait correspondre à la distance que l'espèce ciblée est capable de parcourir en 1 an, c'est-à-dire un rayon correspondant à l'aire typique de son domaine vital annuel (Bissonette et Adair, 2008). Afin de s'assurer que les animaux puissent rejoindre les passages fauniques lorsqu'ils se butent aux clôtures, Bissonette et Adair (2008) considèrent que l'espacement optimal de ces passages devrait correspondre à la racine carrée de la superficie de leur domaine vital annuel, aussi appelée distance allométrique. Ce concept est intéressant puisqu'il s'applique à diverses espèces.

Bien que l'utilisation de clôtures bien entretenues constitue assurément la meilleure façon d'éviter les collisions avec les grands mammifères, cette méthode est coûteuse et ne peut pas être appliquée partout. Dans les secteurs non clôturés, les mesures d'atténuation liées à la gestion des mares

Paul Grosman a obtenu sa maîtrise au Département de géographie, urbanisme et environnement de l'Université Concordia (paul.grosman@gmail.com) où Jochen A.G. Jaeger (jjaeger@alcor.concordia.ca) et Pascale Biron (pascale.biron@concordia.ca) sont professeurs.

Christian Dussault est chercheur en faune terrestre au ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

christian.dussault@mrrnf.gouv.qc.ca

Jean-Pierre Ouellet est vice-recteur à la formation et à la recherche à l'Université du Québec à Rimouski.

jean-pierre_ouellet@uqar.qc.ca

salines demeurent donc pertinentes et doivent être évaluées. La modélisation individu-centrée est une approche de plus en plus utilisée en écologie afin de tenir compte de la variabilité entre les individus pour dégager des caractéristiques globales de la population (Grimm, 1999; Grimm et Railsback, 2005). Nous présentons ici un modèle individu-centré (MIC) développé pour la réserve faunique des Laurentides (RFL) dont l'objectif était d'examiner l'efficacité du drainage des mares salines et de la création de mares salines compensatoires comme mesures d'atténuation des accidents routiers avec l'original. Nous avons utilisé le nombre de traversées de la route 175 par les orignaux comme indice du risque de collision. Dans un deuxième temps, nous proposons un cadre conceptuel pour modifier le MIC développé à l'étape précédente afin d'évaluer l'impact de la distance entre les passages fauniques sur la perméabilité de la route 175 aux déplacements des orignaux.

Aire d'étude

L'aire d'étude se situe autour de la route 175 dans la RFL. Pour les simulations relatives aux mares salines, la zone d'étude, de 46 km × 26 km, est située au nord de l'intersection entre la route 175 et la route 169 (entre Québec et Saguenay, figure 1).

La route 175 a subi de profondes modifications depuis 2006, passant de 2 à 4 voies divisées par un terre-plein. Ces transformations incluent aussi l'ajout de clôtures et de passages fauniques (AECOM-Tecsult inc., 2009, 2010). Les clôtures ont été installées sur une distance de 23 km dans la section nord de la RFL et sur 37 km dans la section sud. Six passages fauniques furent construits, soit 2 dans la section clôturée au sud, 2 dans la section clôturée au nord, 1 au lac Tourangeau et 1 à la rivière Jacques-Cartier (figure 1).

Matériel et méthodes

Le MIC que nous avons développé (Grosman et collab., 2011) afin d'examiner l'influence de différentes mesures d'atténuation des accidents, liées à la présence des mares salines, utilise des paramètres de base pour déterminer le mouvement des orignaux dans leur domaine vital annuel, soit la qualité de la nourriture et du couvert. De plus, ce modèle tient compte de 2 caractéristiques importantes du comportement des orignaux, soit la mémoire spatiale des mares salines et l'évitement des routes.

Une banque de repérages télémétriques recueillis toutes les 2 h durant 3 ans sur 47 orignaux porteurs de colliers GPS (environ 200 000 localisations) était disponible pour calibrer et valider le MIC (Dussault et collab., 2007). Nous avons aussi utilisé les polygones forestiers (environ 10 000) des cartes écoforestières du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), ainsi que les routes, les rivières et les lacs, la topographie et la localisation des mares salines près de la route et des mares compensatoires situées loin de la route (à 500 m de la route en moyenne). Les paramètres utilisés pour développer le modèle étaient basés sur la littérature scientifique concernant le comportement des orignaux dans la RFL et leur sélection d'habitat (Dussault et collab., 2004, 2005, 2006a, b, 2007; Leblond et collab., 2007a, b; Laurian et collab., 2008a, b).

Cinq scénarios de gestion des mares salines ont été étudiés: 1) la situation actuelle (36 mares salines au bord de la route), 2) l'élimination de toutes les mares salines au bord de la route, 3) l'élimination de toutes les mares salines au bord de la route et le maintien de seulement 18 mares salines compensatoires, 4) l'élimination de 2/3 des mares salines au bord de la route (12 mares salines seulement) et 5) l'élimination

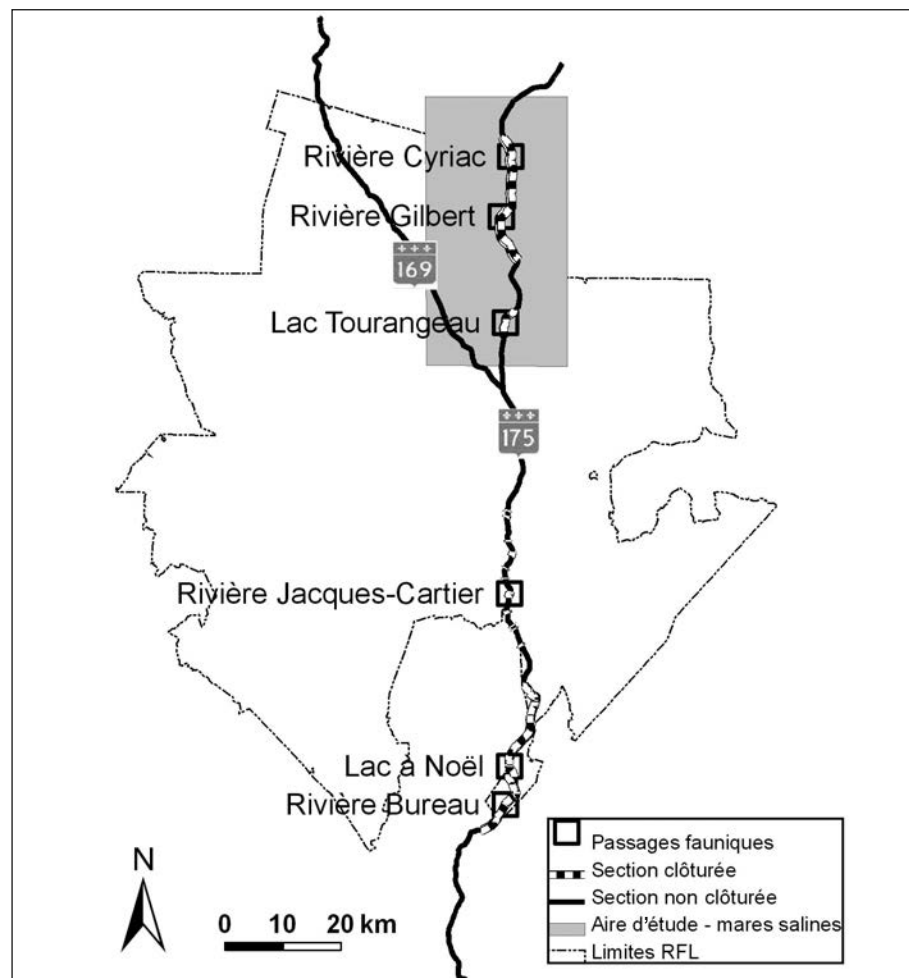


Figure 1. L'aire d'étude dans la réserve faunique des Laurentides (Québec), montrant les 6 passages fauniques ainsi que les sections clôturées et non clôturées le long de la route 175.

de 2/3 des mares salines au bord de la route jumelées à 2/3 des mares salines compensatoires (12 mares salines au bord de la route + 12 mares salines compensatoires). Les 5 scénarios ont donc été simulés avec un module d'évitement des routes et de mémoire des mares salines. Toutefois, ces 2 comportements ont aussi été désactivés dans certaines simulations afin de tester leur impact relatif. Un total de 20 simulations distinctes a donc été produit, soit 5 scénarios jumelés avec l'activation ou la désactivation du comportement d'évitement des routes et de la mémoire spatiale des mares salines.

Nous avons postulé que les orignaux divisent leur journée en 4 activités (alimentation, rumination, déplacement, repos) pour une durée de 6 h chacune (Renecker et Schwartz, 1998). Une fonction mathématique simulant les déplacements a été développée à partir des déplacements réels de 12 orignaux (Grosman et collab., 2011). Après une calibration, nous avons utilisé les distances suivantes : 0 m pour le repos, 0 à 125 m pour l'alimentation et la rumination et 125 à 550 m pour les déplacements. Les orignaux font aussi quelques déplacements de grande amplitude (275 à 550 m) orientés vers les mares salines (en moyenne 2,1 fois par été; Laurian et collab., 2008a).

Nous avons modélisé le comportement de 40 orignaux virtuels. La plupart des orignaux ont tendance à éviter les routes et semblent avoir une mémoire spatiale des mares salines (Laurian et collab., 2008b). Puisque le comportement d'évitement des routes est présent chez 90 % des orignaux (Laurian et collab., 2008b), le MIC a assigné ce comportement à 36 des 40 orignaux virtuels, sauf lorsqu'ils étaient en déplacement pour chercher les mares salines. Quand la mémoire spatiale des mares salines était activée, les orignaux virtuels se souvenaient de la localisation de toutes les mares salines trouvées dans leur domaine vital annuel. Lors d'un déplacement orienté vers une mare saline, l'orignal choisissait donc celle qui était la plus proche. Lorsque la mémoire spatiale des mares salines n'était pas activée, l'orignal pouvait trouver un maximum de 3 mares salines, suite à quoi il n'était plus attiré par les mares salines (en supposant que son besoin en sodium avait été comblé). Chaque orignal virtuel demeurait à l'intérieur de son domaine vital annuel, avec une zone tampon vers l'extérieur de 625 m pour faciliter l'accès aux mares salines qui sont souvent situées à la limite du domaine vital annuel (Laurian et collab., 2008b).

Chaque simulation était réalisée du 1^{er} mai au 30 septembre, avec un intervalle de 2 h. Afin d'obtenir au moins 100 simulations, nous avons fait rouler le modèle 34 fois pour chaque été, durant 4 étés. Le mouvement des orignaux était déterminé par 5 paramètres : la nourriture, le couvert végétal, la proximité d'une mare saline, la proximité de l'eau et la pente, avec des poids de 0,45, 0,10, 0,30, 0,10 et 0,05, respectivement. La programmation a été effectuée en Java avec la structure de MIC de Repast Symphony 1.2 (Repast Symphony, 2008).

Résultats et discussion

La modélisation représentait bien le comportement des orignaux puisque la sélection d'habitat des orignaux réels et virtuels concorde très bien. En effet, la proportion du temps que les orignaux virtuels passent dans chaque type d'habitat correspond bien à l'utilisation qu'en ont faite les orignaux réels (figure 2). Le nombre de traversées de la route variait nettement selon le scénario de réduction des mares salines et selon le comportement d'évitement des routes et de mémoire des mares salines des orignaux virtuels (figure 3).

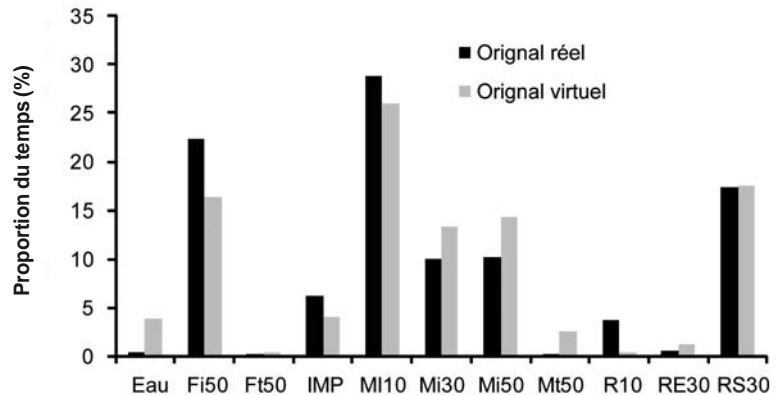


Figure 2. Comparaison de l'utilisation de l'habitat par 12 orignaux virtuels et 12 orignaux réels. La proportion du temps représente la proportion des localisations dans chaque habitat divisé par le nombre total de localisations. Fi50: feuillus intolérants à l'ombre ≥ 50 ans; Ft50: feuillus tolérants à l'ombre ≥ 50 ans; IMP: aire improductive; Mi10: mixte intolérant à l'ombre de 10 ans; Mi30: mixte intolérant à l'ombre de 30 ans; Mi50: mixte intolérant à l'ombre ≥ 50 ans; Mt50: mixte tolérant à l'ombre ≥ 50 ans; R10: résineux en régénération; RE30: résineux avec épinettes noires ≥ 30 ans; RS30: résineux avec sapins baumiers et épinettes blanches ≥ 30 ans.

Dans la situation actuelle (scénario 1), il y avait une moyenne de 4,2 traversées de la route par orignal par été (figure 3a). Sans la mémoire spatiale des mares salines, le nombre de traversées de la route diminuait de 31 % (à 2,93). Le plus grand impact de ne pas considérer la mémoire spatiale des mares salines a été observé lorsque 2/3 des mares salines de bord de route ont été enlevées sans mare saline compensatoire (scénario 4), alors que le nombre de traversées de la route a diminué de 44 % (de 3,30 à 1,84). La mémoire spatiale des mares salines faisait augmenter le nombre de traversées de route par les orignaux dans tous les scénarios, indépendamment de l'emplacement des mares salines (bord de la route ou compensatoires) lorsque le comportement d'évitement des routes n'était pas activé.

Les scénarios d'aménagement des mares salines peuvent être évalués en termes de réduction des traversées de la route en comparaison avec la situation actuelle (scénario 1; figure 3b). Lorsque les comportements d'évitement des routes et de mémoire des mares salines étaient activés, les scénarios 2 (élimination de toutes les mares salines) et 3 (toutes les mares salines au bord de la route enlevées avec maintien des mares salines compensatoires) généraient sensiblement moins de

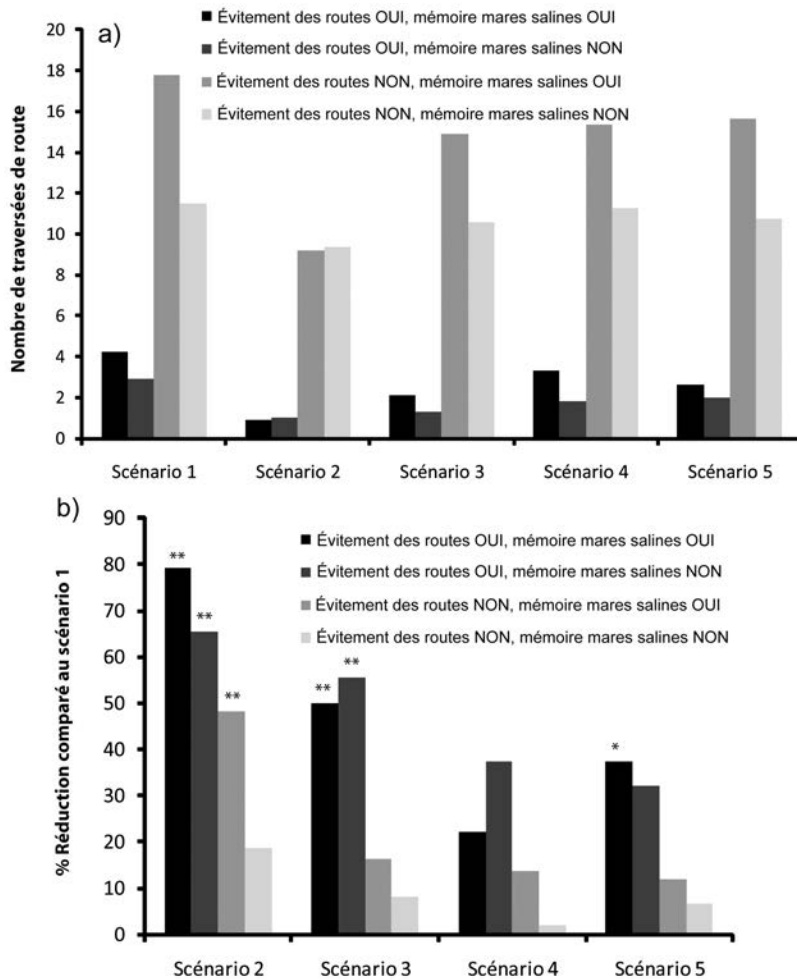


Figure 3. a. Nombre de traversées de route par les orignaux virtuels pour les 5 scénarios et b. réduction du nombre de traversées de route par les orignaux virtuels en comparaison avec la situation actuelle (scénario 1). ** = $p < 0,05$ et * = $p < 0,10$. Les données sont basées sur les moyennes des 3 années pour les 40 orignaux virtuels.

traversées que dans la situation actuelle, avec des réductions de 79 % et 50 %, respectivement.

Étant donné que la plupart des orignaux évitent les routes et ont une mémoire spatiale de la localisation des mares salines, notre recommandation pour les gestionnaires serait d'éliminer, dans la mesure du possible, toutes les mares salines au bord de la route. Si des mares compensatoires sont utilisées, nos résultats indiquent qu'elles devraient être placées le plus loin possible des routes (au moins à 500 m) pour être efficaces. Plus de détails sur ces résultats sont disponibles dans Grosman et collab. (2011).

Travaux en cours : un modèle pour évaluer l'efficacité des clôtures et des passages fauniques

Dans la RFL, en se basant sur l'approche de Bissonette et Adair (2008), l'espacement allométrique des passages fauniques pour l'original serait de 7 km. Or, l'espacement

moyen entre les passages fauniques dans la RFL est de 29 km (6 passages fauniques sur une section de 174 km). Afin de respecter l'espacement allométrique, il faudrait installer 25 passages fauniques, soit 4 fois plus que la situation actuelle. Le nombre et l'espacement entre les passages fauniques dans la RFL diffèrent considérablement de ce qui s'est fait ailleurs en Amérique du Nord et en Europe (figure 4). Compte tenu des différences majeures de design entre le projet de la RFL et les autres projets, il est important de modéliser l'impact possible d'un plus grand nombre de passages fauniques sur la connectivité. Bien que le passage d'une petite partie de la population puisse maintenir la diversité génétique, il faut permettre à une proportion suffisamment élevée d'individus de traverser la route pour garantir l'efficacité de la clôture. En effet, s'il n'y a pas assez de possibilités de passages pour les orignaux le long de la clôture, ceux-ci pourraient alors traverser aux extrémités de celle-ci et augmenter localement le risque de collision.

Nous avons modifié le MIC utilisé pour évaluer l'efficacité de l'aménagement des mares salines afin de simuler le comportement des orignaux le long d'une route clôturée et équipée de passages fauniques. L'objectif de cette démarche est d'analyser l'impact de l'espacement entre les passages fauniques sur la connectivité entre les 2 côtés de la route. Toutefois, il n'existe pas, à notre connaissance, de données disponibles décrivant le comportement de l'original face à une clôture. Nous présentons ici un cadre conceptuel qui tient compte de plusieurs comportements potentiels des orignaux près des clôtures et des passages fauniques. Ce cadre conceptuel permettra

de développer un modèle qui pourra déterminer comment l'espacement entre les structures fauniques modifie la connectivité du paysage dans la RFL. Pour ce faire, plusieurs scénarios seront simulés par le MIC. Le scénario le plus simple utilisera les 6 passages fauniques actuels (espacement moyen de 29 km) et le plus complexe utilisera 40 passages (espacement moyen de 4,4 km). La connectivité sera évaluée pour chaque scénario en utilisant le nombre de traversées des passages fauniques par les orignaux virtuels. Les résultats de cette approche devront être interprétés avec précaution puisque seul le scénario correspondant à la situation actuelle peut être validé à l'aide des données d'utilisation des passages fauniques recueillies par des détecteurs de mouvements munis de caméras (Y. Leblanc, AECOM-Tecslut inc., comm. pers.).

La première règle de mouvement que nous ajouterons au MIC concerne la situation où un orignal se trouve dans son domaine vital annuel et s'approche de la route 175. L'original

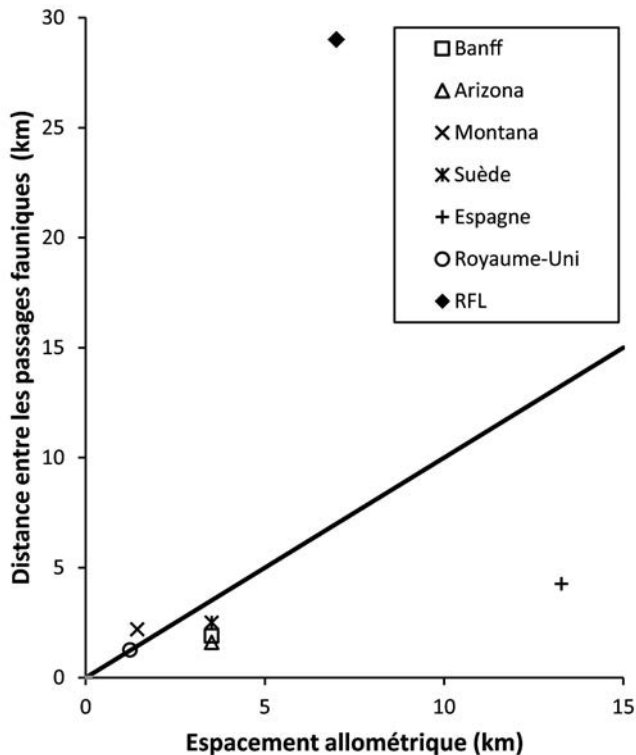


Figure 4. Distance moyenne entre les passages fauniques en comparaison avec l'espacement allométrique pour 7 routes en Amérique du Nord et en Europe. La ligne représente une pente unitaire. D'après Beckmann et collab. (2010; Banff, Arizona et Montana), Olsson et collab. (2008; Suède), Mata et collab. (2008; Espagne) et Langbein (2010; Royaume-Uni). RFL représente la réserve faunique des Laurentides (Québec).

virtuel doit alors décider s'il longe la clôture. Une approche probabilistique basée sur 3 cas est suggérée: 1) la plupart des orignaux tendent à rebrousser chemin et seulement 25 % des orignaux décident de longer la clôture, 2) 50 % des orignaux suivent la clôture et 50 % rebroussent chemin et 3) 75 % des orignaux ont tendance à longer la clôture. Bien que nous ne disposions pas des données pour déterminer lequel de ces 3 cas est le plus probable, nous jugeons qu'il est vraisemblable qu'entre 25 % et 75 % des orignaux qui rencontrent une clôture décident de la longer.

La deuxième décision à étudier pour les orignaux virtuels qui vont longer la clôture est la direction à prendre. Nous avons supposé une probabilité égale à 50 % qu'un orignal tourne vers la gauche ou vers la droite. La troisième règle de mouvement à considérer survient lorsque l'orignal qui suit une clôture atteint la limite de son domaine vital annuel. Va-t-il alors continuer ou s'arrêter? Nous avons supposé que les orignaux pourraient longer la clôture sur une distance d'au moins 1 km et tout au plus de 5 km de plus que la limite de leur domaine vital annuel.

Afin de tester les différents scénarios, nous proposons de simuler le déplacement de 100 orignaux virtuels avec

un intervalle de temps de 2 h pendant 10 années. Chaque scénario sera simulé en utilisant les 3 règles comportementales d'approche des clôtures (25 %, 50 % ou 75 % des orignaux longeant la clôture) et de réaction à l'approche de la limite du domaine vital annuel. Les résultats de ce MIC permettront de voir si la connectivité augmente linéairement avec l'augmentation du nombre de passages fauniques ou si elle se stabilise à un certain point. Du point de vue de l'aménagement, il serait intéressant qu'un plateau soit atteint et qu'on puisse alors optimiser le nombre de passages fauniques.

Conclusion

L'approche par MIC est un outil de gestion très intéressant pour étudier les collisions routières impliquant la faune et l'efficacité des mesures d'atténuation (clôtures, mares compensatoires et passages fauniques). Avec des règles de mouvement relativement simples, nous avons pu simuler assez fidèlement le comportement des orignaux. Il est toutefois essentiel que ce type de modèle soit calibré et validé à l'aide de mesures sur le terrain, ce qui était possible dans le cas du modèle sur les mares salines mais actuellement pas possible pour le modèle sur les passages fauniques. Dans ce contexte, il serait pertinent d'entreprendre, dans la RFL, un projet de télémétrie pour étudier le comportement des orignaux face aux clôtures et aux passages fauniques. Nous pensons que le cadre conceptuel proposé ici, basé sur une approche probabilistique, permettra de développer un MIC qui nous aidera à mieux comprendre l'impact des barrières comme les clôtures sur la connectivité du paysage en périphérie des routes. Le développement d'un tel modèle est important lorsque l'espacement entre les passages fauniques est nettement supérieur à celui utilisé dans les autres projets de ce type à travers le monde, comme c'est le cas dans la RFL.

Remerciements

Ce projet a reçu l'appui financier de la bourse BMP Innovation du CRSNG – FQRNT dont le partenaire était AECOM-Tecsult inc. ◀

Références

- AECOM-TECSULT inc., 2009. Suivi environnemental du projet d'amélioration de la route 175 à quatre voies divisées – Grande faune 2008 : Efficacité des aménagements pour la grande faune. 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, Service de la faune terrestre et de l'avifaune, Québec, 33 p. et annexes.
- AECOM-TECSULT inc., 2010. Suivi environnemental du projet d'amélioration de la route 175 à quatre voies divisées – Grande faune 2009 : Efficacité des aménagements pour la grande faune. 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, Service de la faune terrestre et de l'avifaune, Québec, 35 p. et annexes.
- ATKINSON, R.P.D., C.J. RHODES, D.W. MACDONALD et R.M. ANDERSON, 2002. Scale-free dynamics in the movement patterns of jackals. *Oikos*, 98: 134-140.
- BECKMANN, J.P., A.P. CLEVENGER, M. HUIJSER et J. HILTY, 2010. Safe passages: Highways, wildlife, and habitat connectivity. Island Press, Washington, 396 p.

- BISSONNETTE, J.A. et W. ADAIR, 2008. Restoring habitat permeability to roaded landscapes with isometrically-scaled wildlife crossings. *Biological Conservation*, 141 : 482-488.
- BOTKIN D.B., P.A. JORDAN, A.S. DOMINSKI, H.S. LOWENDORF et G.E. HUTCHINSON, 1973. Sodium dynamics in a northern ecosystem. *Proceeding of the National Academy of Science*, 70 : 2745-2748.
- CLEVENGER, A.P. et N. WALTHO, 2000. Factors influencing the effectiveness of wildlife underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada. *Conservation Biology*, 14 : 47-56.
- CLEVENGER, A.P., B. CHRUSZCZ et K.E. GUNSON, 2001. Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildlife Society Bulletin*, 29 : 646-653.
- DODD, N.L., J.W. GAGNON, S. BOE, A.L. MANZO et R.E. SCHWEINSBURG, 2007. Evaluation of measures to minimize wildlife-vehicle collisions and maintain permeability across highways: Arizona route 260. Arizona Dept. of Transportation, Final report 540, Phoenix, 169 p.
- DUSSAULT, C., J.-P. OUELLET, R. COURTOIS, J. HUOT, L. BRETON et J. LAROCHELLE, 2004. Behavioural responses of moose to thermal conditions in the boreal forest. *Ecoscience*, 11 : 321-328.
- DUSSAULT, C., J.-P. OUELLET, R. COURTOIS, J. HUOT, L. BRETON et H. JOLICOEUR, 2005. Linking moose habitat use to limiting factors. *Ecography*, 28 : 619-628.
- DUSSAULT C., M. POULIN, R. COURTOIS et J.-P. OUELLET, 2006a. Temporal and spatial distribution of moose-vehicle accidents in the Laurentides Wildlife Reserve, Quebec, Canada. *Wildlife Biology*, 12 : 415-425.
- DUSSAULT, C., R. COURTOIS et J.-P. OUELLET, 2006b. A habitat suitability index model to assess moose habitat selection at multiple spatial scales. *Canadian Journal of Forest Research*, 36 : 1097-1107.
- 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*, 71 : 2338-2345.
- FAHRIG, L. et T. RYTWINSKI, 2009. Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. [En ligne] *Ecology and Society*, 14 (1) : art. 21.
- GAGNON, J.W., N.L. DODD, K.S. OGREN et R.E. SCHWEINSBURG, 2011. Factors associated with use of wildlife underpasses and importance of long-term monitoring. *Journal of Wildlife Management*, 75 : 1477-1487.
- GRIMM, V., 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling*, 115 : 129-148.
- GRIMM, V. et S.F. RAILSBACK, 2005. *Individual-based modeling and ecology*. Princeton University Press, Princeton, 428 p.
- GROSMAN, P.D., J.A.G. JAEGER, P.M. BIRON, C. DUSSAULT et J.-P. OUELLET, 2011. Trade-off between road avoidance and attraction by roadside salt pools in moose: An agent-based model to assess measures for reducing moose-vehicle collisions. *Ecological Modelling*, 222 : 1423-1435.
- 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*, 185 : 329-348.
- JOLICOEUR, H. et M. CRÊTE, 1994. Failure to reduce moose-vehicle accidents after a partial drainage of roadside salt pools in Québec. *Alces*, 30 : 81-89.
- LANGBEIN, J., 2010. Pilot study to assess the potential of selected existing structures on the A30 and A38 trunk roads to provide safer crossing places for deer. The Deer Initiative. Langbein Wildlife Associates, Wrexham, 40 p.
- LAURIAN, C., C. DUSSAULT, J.-P. OUELLET, R. COURTOIS, M. POULIN et L. BRETON, 2008a. Behavioural adaptations of moose to roadside salt pools. *Journal of Wildlife Management*, 72 : 1094-1100.
- LAURIAN, C., C. DUSSAULT, J.-P. OUELLET, R. COURTOIS, M. POULIN et L. BRETON, 2008b. Behaviour of moose relative to a road network. *Journal of Wildlife Management*, 72 : 1550-1557.
- LEBLOND, M., C. DUSSAULT, J.-P. OUELLET, M. POULIN, R. COURTOIS et J. FORTIN, 2007a. Electric fencing as a measure to reduce moose-vehicle collisions. *Journal of Wildlife Management*, 71 : 1695-1703.
- LEBLOND, M., C. DUSSAULT, J.-P. OUELLET, M. POULIN, R. COURTOIS et J. FORTIN, 2007b. Management of roadside salt pools to reduce moose-vehicle collisions. *Journal of Wildlife Management*, 71 : 2304-2310.
- MATA, C., I. HERVAS, J. HERRANZ, F. SUAREZ et J.E. MALO, 2008. Are motorway wildlife passages worth building? Vertebrate use of road-crossing structures on a Spanish motorway. *Journal of Environmental Management*, 88 : 407-415.
- OLSSON, M.P.O., P. WIDEN et J.L. LARKIN, 2008. Effectiveness of a highway overpass to promote landscape connectivity and movement of moose and roe deer in Sweden. *Landscape and Urban Planning*, 85 : 133-139.
- RENECKER, L.A. et C.C. SCHWARTZ, 1998. Food habits and feeding behavior. Dans : Franzmann, A.W. et C.C. Schwartz (Édit.). *Ecology and management of the North American moose*. Smithsonian Institution Press, Washington p. 403-439.
- REPAST SIMPHONY, 2008. Repast Organization for Architecture and Design. Disponible en ligne à : <http://repast.sourceforge.net>. [Visité le 09-06-19].



Des solutions PLUS INNOVANTES

Chef de file mondial en environnement, nos professionnels possèdent une vaste connaissance des besoins locaux et régionaux et détiennent les compétences pour relever les défis de toute envergure. Nos experts en passages fauniques développent des solutions créatives et durables pour rendre nos infrastructures routières plus perméables à la faune.

AECOM, c'est plus de 45 000 employés dans 125 pays qui créent, améliorent et préservent les environnements bâtis, naturels et sociaux du monde entier.

www.aecom.com

AECOM