



Évaluation de la rigueur des conditions hivernales pour le cerf de Virginie à partir des données météorologiques :

Effets des scénarios de changements climatiques sur l'indicateur NIVA

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Auteurs : Maxime Lavoie, biologiste Ph.D.

Service de la gestion des espèces et des habitats terrestres
Pierre Blanchette

Collaboration : **Service de la gestion des espèces et des habitats terrestres**
Christian Dussault
François Lebel

Ce travail a été financé dans le cadre de l'action 29.2.4 : Évaluation des potentiels d'exploitation et adaptation de la gestion des ressources fauniques aquatiques et terrestres en priorisant la pérennité alimentaire des communautés autochtones, du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

LAVOIE, M. et P. BLANCHETTE (2017). *Évaluation de la rigueur des conditions hivernales pour le cerf de Virginie à partir des données météorologiques : effets des scénarios de changements climatiques sur l'indicateur NIVA*, Québec, Direction générale de la gestion de la faune et des habitats et Direction de l'expertise sur la faune terrestre, l'herpétofaune et l'avifaune, 48 p.

© Gouvernement du Québec
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2017
ISBN 978-2-550-79169-0 (imprimé)
ISBN 978-2-550-79170-6 (PDF)

Remerciements

Nous tenons à remercier Ouranos et Travis Logan d'avoir généré et fourni les données de projections climatiques. Nous sommes également reconnaissants envers le groupe de travail sur les modèles couplés (GTMC) du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), qui est responsable du *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), et nous remercions les centres de modélisation climatique pour la production et la mise à disposition de leurs sorties de modèle. Pour CMIP, le Programme de comparaison et de diagnostic des modèles climatiques du ministère américain de l'Énergie a fourni le soutien de coordination et a mené le développement des infrastructures de logiciels en partenariat avec l'Organisation mondiale des portails pour la science du système Terre.

Résumé

La saison hivernale est la période la plus difficile pour les populations de cerfs de Virginie habitant le nord de leur aire de répartition. En effet, la survie et le comportement des individus sont influencés par les conditions météorologiques, principalement par l'abondance de neige au sol et la température ambiante. L'utilisation d'indices de la rigueur des conditions hivernales permet de moduler annuellement l'exploitation du cerf de Virginie en déterminant le nombre de permis de chasse aux cerfs sans bois délivrés. Cette pratique est répandue dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Au Québec, l'indicateur de rigueur hivernal NIVA nécessite la prise de données bimensuelles, et ce, tout au long de l'hiver. Cette activité engendre annuellement des coûts en ressources humaines et matérielles.

L'objectif de ce projet était d'évaluer les effets probables des changements climatiques sur l'indicateur NIVA et les répercussions sur la gestion du cerf de Virginie qui en découlent. Le projet visait également à évaluer la possibilité de créer un indice de la rigueur des conditions hivernales pour les cerfs de Virginie au Québec en utilisant les données couramment enregistrées dans les stations météorologiques. Les résultats de l'étude montrent que selon les projections de l'indice de rigueur hivernale, les hivers devraient devenir plus cléments pour les cerfs de Virginie au courant du prochain siècle. Par contre, les conditions pourraient toujours être difficiles pour plusieurs ravages au Québec et de nouveaux ravages pourraient apparaître vers le nord, affichant des conditions hivernales similaires à ce qui est actuellement observé dans le sud du Québec. Un indice de rigueur hivernale devrait donc être utile à court, moyen et long terme pour la gestion de cette espèce au Québec.

La mesure d'enfoncement du cerf de Virginie dans la couche nivale (NIVA) a pu être estimée en utilisant les données de l'abondance de neige au sol, la température moyenne, la quantité de pluie tombée, le mois ainsi que l'altitude et les coordonnées géographiques provenant de stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada. Ce nouvel indice de rigueur hivernale estime d'une façon plus précise les conditions hivernales que l'indicateur NIVA. Nous croyons donc qu'il est possible d'estimer avec une précision accrue l'indice de rigueur des conditions hivernales à la fin de l'hiver, donnée qui peut ensuite être utilisée pour, entre autres, déterminer le nombre de permis de chasse aux cerfs sans bois à délivrer. Nous avons créé un fichier Excel simple d'utilisation qui sert à calculer ce nouvel indicateur de la rigueur des conditions

hivernales. Cette nouvelle méthode peut donc être employée efficacement pour calculer un indice de rigueur des conditions hivernales pour le cerf de Virginie et constitue ainsi un nouvel outil de gestion pour cette espèce.

Table des matières

Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des annexes	xi
Introduction	1
Aire d'étude.....	4
Méthodes	5
Collecte des données	5
Analyses statistiques	9
Relations entre l'indicateur NIVA, l'enfoncement et l'enneigement, et les caractéristiques physiques des stations de règles à neige	9
Relations entre les caractéristiques physiques et les données météorologiques des stations météorologiques et l'enfoncement calculé aux stations de règles à neige.....	10
Projection de l'indice de rigueur hivernale jusqu'en 2100	11
Comparaison de la fiabilité de l'indicateur NIVA et de l'indice de rigueur hivernale pour la gestion du cerf de Virginie	12
Résultats et discussion	12
Relations entre l'indicateur NIVA, l'enfoncement et l'enneigement, et les caractéristiques physiques des stations de règles à neige	12
Relations entre les caractéristiques physiques des stations et les données des stations météorologiques et l'enfoncement calculé aux stations de règles à neige.....	13
Comparaison entre l'indicateur NIVA et l'indice de rigueur hivernale déterminé à partir des stations météorologiques.....	21
Projection de l'indice de rigueur hivernale jusqu'en 2100	24
Conclusion	30
Références	32
Annexes.....	36

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des 30 stations de règles à neige du MFFP au Québec.	6
Tableau 2. Caractéristiques des 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada situées les plus proches des stations de règles à neige utilisées pour évaluer l'indice NIVA au Québec.	7
Tableau 3. Paramètres du modèle final de l'enfoncement du cerf de Virginie dans la neige.	14
Tableau 4. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'indicateur NIVA annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige opérées par le MFFP entre 1975 et 2015. Certains modèles testent l'importance des interactions entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	16
Tableau 5. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt), des coordonnées géographiques (lat et long), du mois (Mois) et du jour dans l'année (Jour_jul) sur l'enfoncement à chacun des relevés (n = 7132) calculé à 30 stations de règles à neige opérées par le MFFP entre 1975 et 2015. Certains modèles testent l'importance des interactions entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	16
Tableau 6. Modèles évaluant la relation entre l'enfoncement à chacun des relevés (n = 7132) calculés à 30 stations de règles à neige opérées par le MFFP entre 1975 et 2015 et la neige au sol (N), la température moyenne (Tmoy), la quantité de pluie moyenne (Pmoy), le mois (Mois), l'altitude (Alt), la latitude (Lat), et la longitude (Long) provenant de 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada. Les variables ont également été calculées rétroactivement de 1 semaine (_1) jusqu'au début de l'hiver (_h). Le signe Δ représente la différence entre la station météorologique et le ravage. Certains modèles testent l'importance des interactions entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet racine carrée ($\sqrt{\quad}$) et cubique ($\sqrt[3]{\quad}$) ont également été évalués. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	17

Tableau 7. Différence moyenne entre le NIVA mesuré dans chacune des stations de règles à neige et l'indice de rigueur hivernale calculé selon la formule 1 entre 2008 et 2015.....	19
Tableau 8. Probabilité (en pourcentage) de classer l'indice de rigueur hivernale calculé avec la formule 1 dans trois niveaux de rigueur (facile < 3000, intermédiaire = [3000, 5000], difficile > 5000) selon le classement du NIVA calculé aux 30 stations de règles à neige entre 2008 et 2015.	20
Tableau 9. Coefficient de détermination entre la variation de la récolte par rapport à celle de l'année précédente et le NIVA mesuré dans les stations à neige ou l'indice de rigueur hivernale déterminé selon la formule 1 par zone de chasse.	22
Tableau 10. Projection de l'indice de rigueur moyen lissé calculé selon la formule 1 en 2100 pour chacun des ravages produit à partir de prévision météorologique venant de 5 modèles CIMP5 forcés selon les scénarios RCP4.5 ou RCP8.5.	26

Liste des figures

Figure 1. Localisation des 30 stations munies de règles à neige (triangles verts) et des 46 stations météorologiques gérées par Environnement et Changement climatique Canada (cercles rouges) dans le sud du Québec.....	4
Figure 2. Relation entre l'enfoncement observé de façon bimensuelle dans 30 stations du MFFP munies de règles à neige de 1975 à 2015 et l'enfoncement calculé à partir de 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada selon la formule 1 pour le sud du Québec. Le modèle inclut une interaction entre l'épaisseur de neige au sol, la température moyenne, la pluie, le mois, l'altitude, la latitude et la longitude. La ligne rouge correspond à une relation parfaite.	18
Figure 3. Relation entre le NIVA calculé dans 30 stations munies de règles à neige de 2008 à 2015 et l'indice de rigueur hivernale calculé à partir de 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada selon la formule 1 pour le sud du Québec. Le modèle inclut une interaction entre l'épaisseur de neige au sol, la température moyenne, la pluie, le mois, l'altitude, la latitude et la longitude, La ligne rouge correspond à une relation parfaite.	20
Figure 4. Relation entre l'indice de rigueur hivernale et le taux de mortalité des cerfs dans quatre ravages du Québec, Les deux indices présentés sont : le NIVA calculé à partir des stations à neige (carrés, bleu) et l'indice calculé selon la formule 1 (cercles, noir).	21
Figure 5. Relation entre le NIVA calculé aux stations à neige et la proportion d'accidents routiers annuels par zone de chasse au Québec.	23
Figure 6. Relation entre l'indice de rigueur hivernale et la proportion d'accidents routiers annuels par zone de chasse au Québec.	24
Figure 7. Moyenne des projections de l'indice de rigueur hivernale moyen lissé calculé selon la formule 1 jusqu'en 2100 produit à partir de prévision météorologique venant de 5 modèles CIMP5 forcés selon les scénarios RCP4,5 (ligne pleine) ou RCP8,5 (ligne pointillée) pour l'ensemble des 30 ravages. Les intervalles de confiances à 95 % sont présentés en bleu (RCP4,5) et gris (RCP8,5). La ligne rouge représente la limite supérieure d'un hiver considéré comme facile pour le cerf de Virginie.	25
Figure 8. Indice de rigueur hivernale pour le cerf de Virginie en 2016, 2050 et 2100 produit à partir de prévision météorologique venant de 5 modèles CIMP5 forcés selon les scénarios RCP4,5 (A) ou RCP8,5 (B) pour le Québec méridional.	28

Figure 8. (Suite)29

Liste des annexes

Annexe 1. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enfoncement maximal annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	37
Annexe 2. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enfoncement moyen annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude et la triple interaction (:) ont également été évalués. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	38
Annexe 3. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enfoncement cumulatif annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	39
Annexe 4. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enneigement maximal annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	40
Annexe 5 Modèle évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enneigement moyen annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.	41

Annexe 6. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enneigement cumulatif annuel (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.42

Annexe 7. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre moyen de jours de plus de 50 cm d'enfoncement annuellement (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.43

Annexe 8. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre cumulatif de jours de plus de 50 cm d'enfoncement annuellement (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.44

Annexe 9. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre moyen de jours de plus de 50 cm d'enneigement annuellement (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.45

Annexe 10. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre cumulatif de jours de plus de 50 cm d'enneigement annuellement (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude et la triple interaction (:) ont également été évalués. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.46

Annexe 11. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre de jours entre le premier et le dernier relevé (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.47

Annexe 12. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt), des coordonnées géographiques (lat et long), du mois (Mois) et du jour dans l'année (Jour_jul) sur l'enneigement à chacun des relevés (n = 7132) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.48

Introduction

Le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) a récemment agrandi son aire de répartition vers le nord (Côté et coll., 2004). Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ce phénomène, mais la modification des caractéristiques de la neige en hiver, causé par le réchauffement climatique global, est l'une de celles ayant reçu le plus de soutien (Dawe et coll., 2014). De plus, les changements climatiques auraient allongé la saison de croissance de la végétation dans les forêts boréales (Jarvis et Linder 2000), ce qui aurait entraîné l'augmentation des ressources alimentaires pour le cerf favorisant sa survie et sa productivité. Par contre, dans les régions où les hivers sont rigoureux, les conditions climatiques influencent toujours le comportement (Olson et coll., 2015) et la survie des cerfs (DelGiudice et coll., 2013).

L'hiver est la période de l'année la plus difficile pour le cerf de Virginie dans le nord de son aire de répartition. Par exemple, au cours de six années au Minnesota, 84 % des morts sont survenues de novembre à mai (DelGiudice et coll., 2002). Durant cette saison, les conditions météorologiques, principalement la température et l'abondance de neige au sol, seraient les principaux facteurs influençant le comportement et la survie des individus (DelGiudice et coll., 2013). En effet, une diminution de la température, même en absence de neige, inciterait les cerfs à diriger vers les ravages hivernaux, qui offrent une protection thermique accrue en raison de la présence de conifères (Ozoga et Gysel 1972). La quantité de neige au sol a toutefois un effet négatif plus important sur la survie et la dynamique des populations de cette espèce. Une augmentation de l'abondance de neige au sol restreint la mobilité des individus, augmente les coûts énergétiques liés à la locomotion et réduit la disponibilité de la nourriture (Morrison et coll., 2003, Massé et Côté 2013), en plus de rendre les cerfs plus vulnérables à la prédation (DelGiudice et coll., 1998). Le taux de survie du cerf diminuerait grandement lorsque l'épaisseur de la couche nivale dépasse 40 à 50 cm (Tierson et coll., 1985, Morrison et coll., 2003). Par contre, l'augmentation de la vulnérabilité à la prédation et la réduction de la mobilité des cerfs seraient principalement dues à l'enfoncement des individus dans la neige plutôt qu'à l'épaisseur de celle-ci.

La plupart des provinces et États du nord-est de l'Amérique du Nord utilisent des indices de rigueur des conditions hivernales basés sur les conditions météorologiques pour la gestion du cerf de Virginie. Au Québec, la gestion du nombre de permis vendus pour la chasse aux cerfs

sans bois se base, entre autres, sur l'indicateur NIVA, soit la somme de l'enfoncement quotidien de la première neige à la fonte totale. Cet indicateur intègre les effets combinés de l'enfoncement du cerf dans la neige et de la longueur de l'hiver (Potvin et Breton 1992). Il existe une relation entre l'indice NIVA et la survie des cerfs ($r^2 = 0.81$) et il permet de prévoir 66 % des hivers rigoureux dès la fin de janvier (Potvin et Breton 1992). Par contre, il nécessite des travaux sur le terrain, notamment la mesure de l'enfoncement à l'aide d'un pénétromètre calibré pour le cerf, et de l'épaisseur de neige au sol. Ces données doivent être colligées toutes les deux semaines tout au long de l'hiver, engendrant des coûts en ressources humaines et matérielles.

L'enfoncement d'un cerf dans la neige dépend à la fois de ses caractéristiques physiques, telles que la longueur de la patte, la surface portante, le poids et la vitesse de son déplacement (Parker et coll., 1984, Renard et coll., 2008), mais aussi essentiellement de deux caractéristiques physiques de la neige : la densité et la dureté (Skogland 1978). La densité de la neige réfère à sa masse par volume, habituellement exprimée en kilogrammes par mètre cube. Une densité plus élevée est engendrée par des températures plus chaudes ou des vents plus forts et elle augmente avec le temps à cause de la compaction de la neige. La dureté de la neige fait plutôt référence à la force requise pour produire une dépression à sa surface et est souvent déterminée à l'aide d'un pénétromètre (Pielmeier et Schneebeli 2002). Lorsque la densité de la neige augmente, l'enfoncement d'un animal diminue (Bunnell et Jones 1984) et une croûte de neige très résistante peut même supporter un cerf (Bunnell et coll., 1990a). En suivant un cerf muilet (*Odocoileus hemionus*) captif, Bunnell et coll., (1990 b) ont démontré que l'épaisseur de neige n'était pas efficace pour prédire l'enfoncement du cerf, mais que ce dernier pouvait être prédit à 65 % par la densité (Enfoncement = $-7,94 * \ln[\text{Densité}]$) et à 86 % par la densité et la dureté de la neige (Enfoncement = $23,03 - 29,13 * \text{Densité} - 0,003 * \text{Dureté}$).

La densité de la neige est influencée par les conditions météorologiques (Judson et Doesken 2000, Pomeroy et Brun 2001). En effet, celle-ci pourrait être prédite à 84 % par la température [Densité = $67,9 + 51,25 * e^{\frac{\text{Température}}{2,59}}$; Hedstrom et Pomeroy 1998] ou à 84 % par une interaction entre la température et la vitesse moyenne du vent de novembre à mars (Densité = $0,152 - 0,0031 * \text{Température} + 0,019 * \text{Vitesse du vent}$; Billello 1969). De plus, la densité de la neige pourrait être prédite à 70 % par la dureté de la neige ($0,03 + 0,05 * \ln[\text{Dureté}]$; Skogland 1978). Par conséquent, il serait théoriquement possible d'estimer l'enfoncement des cerfs dans la neige à partir des données appropriées collectées à des stations météorologiques et ainsi évaluer la rigueur des conditions hivernales sans devoir effectuer des mesures directes

avec un pénétromètre sur le terrain. Cela permettrait d'alléger considérablement la logistique associée à la collecte des données, de même que les coûts en ressources humaines et matérielles.

Le réchauffement climatique devrait avoir un effet plus marqué durant la saison froide (IPCC 2013). On prévoit donc une diminution de la variabilité inter-saisonnière, principalement quant à la fréquence des précipitations sous forme de neige (Krasting et coll., 2013). Par contre, à cause de l'augmentation du taux d'humidité atmosphérique découlant d'une évaporation accrue, la quantité de neige ou de pluie tombée par tempête sera plus importante (Chaumond et Brown 2010, Hansen et coll., 2011). Ces modifications des conditions hivernales pourraient avoir un effet important sur la survie des cerfs et la dynamique des populations telles qu'elles sont observées actuellement. Il s'avère donc crucial de projeter les conditions climatiques hivernales afin d'évaluer la pertinence de conserver un indice de rigueur hivernale et d'adapter, d'une façon proactive, la gestion du cerf.

L'objectif de ce projet était d'évaluer les effets probables des changements climatiques sur l'indicateur NIVA et les conséquences sur la gestion du cerf de Virginie qui en découlent. Le projet visait également à évaluer la possibilité de créer un indice de la rigueur des conditions hivernales pour les cerfs de Virginie au Québec en utilisant les données couramment enregistrées dans les stations météorologiques. Pour ce faire, nous avons tenté d'établir s'il était possible de prédire l'indicateur NIVA, calculé de façon standard avec les données recueillies aux stations de règles à neige, en utilisant les données météorologiques collectées à diverses stations météorologiques appartenant au réseau d'Environnement et Changement climatique Canada.

Aire d'étude

Les données NIVA provenant de 30 stations de règles à neige situées dans le sud du Québec, en plein cœur de l'aire de répartition du cerf de Virginie au Québec, ont été utilisées (Figure 1). Ces stations de règles à neige, gérées par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), étaient situées dans des peuplements mixtes et, lorsque possible, à proximité de ravages de cerfs de Virginie (Potvin et Breton 1986), à une altitude variant de 65 à 518 m. Les données de 46 stations météorologiques situées à une altitude variant de 15 à 426 m ont également été utilisées (Figure 1).

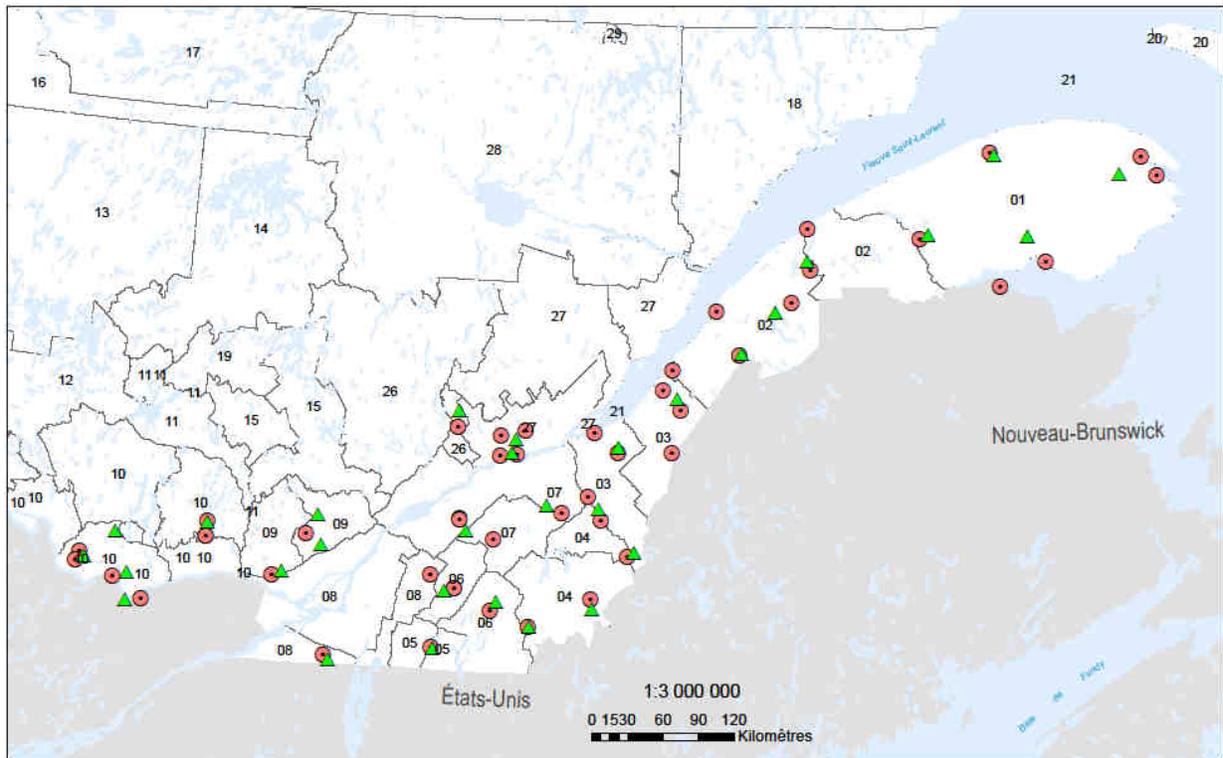


Figure 1. Localisation des 30 stations munies de règles à neige (triangles verts) et des 46 stations météorologiques gérées par Environnement et Changement climatique Canada (cercles rouges) dans le sud du Québec.

Méthodes

Collecte des données

Depuis 1975, l'épaisseur du couvert de neige au sol ainsi que l'enfoncement dans la neige calculé à l'aide d'un pénétromètre calibré pour le cerf ont été mesurés, toutes les deux semaines environ, dans les stations avec règles à neige, et ce, à partir de la première neige jusqu'à la fonte totale. La méthode utilisée est décrite en détail dans Crête et Goudreau (1974). Par contre, le suivi de chaque station ne couvre pas nécessairement l'ensemble de cette période (Tableau 1).

Nous avons acquis les données de toutes les stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada situées à moins de 30 km des stations avec règles à neige pour les années où les stations du MFFP ont été suivies

(http://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html).

Les données obtenues sont la température quotidienne (minimale, maximale et moyenne) ainsi que les précipitations quotidiennes de neige ou de pluie. Chaque station de règles à neige a été jumelée avec la station météorologique la plus proche (Tableau 2).

Tableau 1. Caractéristiques des 30 stations de règles à neige du MFFP au Québec.

Station	Latitude (° décimaux)	Longitude (° décimaux)	Altitude (m)	Première année du suivi	Dernière année du suivi
Armagh	46,75944	-70,61194	311	1976	2015
Armstrong	45,96194	-70,41333	391	1977	2015
Ashberish	47,81028	-68,88163	244	1977	2015
Calway	46,28556	-70,81528	230	2003	2015
Cap-Santé	46,68777	-71,79054	65	1999	2014
Cascapédia	48,36790	-66,00001	382	1981	2015
Causapscal	48,39777	-67,13642	320	1998	2015
Chertsey	46,13079	-73,88059	311	1976	2015
Duchénier	48,20057	-68,52758	203	1997	2015
Duhamel	46,00555	-75,07972	214	2009	2015
Gaspé	48,81150	-64,91067	252	1980	2015
Golf du Grand-Portneuf	46,79440	-71,74907	109	1999	2013
Grande-Rivière	47,13861	-69,97611	354	1977	2015
Hemmingford	45,03861	-73,66250	80	2011	2015
Hillhead	45,68111	-74,23167	128	1976	2015
Island-Brook	45,36694	-71,52306	310	1986	2015
Knowlton	45,17361	-72,55056	252	1980	2015
Lady Smith	45,65166	-76,37555	175	2009	2015
La-Louise	45,51861	-70,85167	518	1986	2015
Lac Meech	45,56475	-75,90278	205	1985	2002
Maniwaki	45,356944	-75,88722	210	1992	2005
Pohénégamook	47,49532	-69,26311	518	1977	2015
Saint-Calixte	45,90775	-73,82733	122	1998	2015
Sainte-Anne-des-Monts	48,99197	-66,35325	391	2000	2015
Sainte-Christine	45,61194	-72,45639	165	1997	2015
Sainte-Eulalie	46,07753	-72,25956	92	1999	2015
Saint-Jacques de Leeds	46,29997	-71,38400	205	1999	2015
Tawachiche	46,98722	-72,39875	337	2008	2015
Venosta	45,87028	-76,06888	178	2009	2015
Watopéka	45,55083	-71,89167	213	1988	2015

Tableau 2. Caractéristiques des 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada situées les plus proches des stations de règles à neige utilisées pour évaluer l'indice NIVA au Québec.

Station météorologique	Station de règle à neige la plus proche	Latitude (° décimaux)	Longitude (° décimaux)	Altitude (m)	Différence d'altitude entre les 2 stations	Distance de la station de règle à neige (km)
Armagh Station	Armagh	46,71667	-70,61667	312	1	5
Saint-Michel	Armagh	46,86667	-70,88333	69	242	25
Saint-Théophile	Armstrong	45,93333	-70,48333	395	4	6
Squateck	Asbérish	47,88333	-68,70000	198	46	17
Rivière-du-Loup	Asbérish	47,81000	-69,55000	147	97	55
Beauceville	Calway	46,20500	-70,78500	229	1	9
Vallée-Jonction	Calway	46,38000	-70,93000	152	78	14
Donnacona 2	Cap-Santé	46,68333	-71,73333	46	19	5
Deschambault	Cap-Santé	46,66667	-71,91667	15	50	11
New Richmond	Cascapédia	48,16667	-65,80000	47	335	28
Charlo Auto	Cascapédia	47,99000	-66,33000	42	340	50
Causapscal	Causapscal	48,36667	-67,23333	168	152	9
Saint-Hippolyte	Chertney	45,98333	-74,00000	366	55	19
Sainte-Trinité des Monts	Duchénier	48,13333	-68,48333	262	59	8
Rimouski	Duchénier	48,45000	-68,52000	36	167	28
Duhamel	Duhamel	46,01667	-75,08333	244	30	1
Chénéville	Duhamel	45,90000	-75,08333	223	9	12
Fontenelle	Gaspé	48,93333	-64,65000	15	237	26
Gaspé A	Gaspé	48,78000	-64,48000	34	218	37
Duchesnay	Golf du Grand Portneuf	46,86667	-71,65000	166	57	11
Donnacona 2	Golf du Grand Portneuf	46,68333	-71,73333	46	63	12
Sainte-Christine	Golf du Grand Portneuf	46,81667	-71,91667	152	43	14
Sainte-Perpétue	Grande-Rivière	47,05000	-69,93333	411	57	10
Saint-Damase	Grande-Rivière	47,20000	-70,13333	274	80	15
Lapocatière	Grande-Rivière	47,35583	-70,03194	31	323	24
Sainte-Lucie	Grande-Rivière	46,73000	-70,02000	373	19	45
Hemmingford 4 Winds	Hemmingford	45,06667	-73,71667	61	19	5
Lachute	Hillhead	45,65000	-74,33333	91	37	9
Sawyerville Nord	Island Brook	45,36667	-71,53333	346	36	1

Station météorologique	Station de règle à neige la plus proche	Latitude (° décimaux)	Longitude (° décimaux)	Altitude (m)	Différence d'altitude entre les 2 stations	Distance de la station de règle à neige (km)
Brome	Knowlton	45,18333	-72,56667	206	46	2
Sutton	Knowlton	46,02000	-71,95000	140	112	8
Shawville	Ladysmith	45,61667	-76,46667	168	7	8
Charteris	Ladysmith	45,68333	-76,43333	168	7	6
Lac Mégantic 2	La Louise	45,60000	-70,86667	426	92	9
Luskville	Lac Meech	45,53000	-76,05000	69	136	12
Ottawa CDA	Maniwaki	45,38000	-75,72000	79	131	14
Sainte-Leuthère	Pohénégamook	47,48333	-69,28333	290	228	2
Rivière-du-Loup	Pohénégamook	47,81000	-69,55000	147	371	42
Saint-Hippolyte	Saint-Calixte	45,98333	-74,00000	366	244	16
Cap-Seize	Sainte-Anne-des-Monts	49,01667	-66,40000	229	162	5
South Durham	Sainte-Christine	45,63333	-72,35000	191	26	9
Durham Sud	Sainte-Christine	45,63333	-72,35000	191	26	9
Saint-Nazaire	Sainte-Christine	45,73333	-72,61667	69	96	19
Saint-Wenceslas	Sainte-Eulalie	46,16667	-72,33333	84	8	12
Arthabaska	Sainte-Eulalie	46,17000	-72,33000	84	8	12
Saint-Pierre-Broughton	Saint-Jacques de Leeds	46,25000	-71,21667	366	161	15
Lac-aux-sables	Tawachiche	46,86667	-72,40000	160	177	13
Wright	Venosta	45,90000	-75,08333	142	36	22
Bromptonville	Watopéka	45,48333	-71,95000	130	83	9

Analyses statistiques

Relations entre l'indicateur NIVA, l'enfoncement et l'enneigement, et les caractéristiques physiques des stations de règles à neige

Nous avons tout d'abord vérifié l'effet de plusieurs variables géographiques, ayant potentiellement une influence sur les conditions météorologiques locales, c'est-à-dire sur les données collectées aux stations de règles à neige du MFFP. Cette analyse permet de vérifier la possibilité d'améliorer l'évaluation de l'indicateur NIVA au cœur d'un ravage en utilisant les données collectées aux stations de règles à neige situées à proximité du ravage. Des modèles linéaires généralisés à effets mixtes ont été utilisés afin de considérer les mesures répétées entre les années. L'analyse des données a été réalisée avec le logiciel Matlab (fitglm, Mathworks, Natick, Massachusetts, États-Unis),

Données annuelles

Nous avons évalué l'effet de l'altitude, de la longitude et de la latitude (en mètres), sur les valeurs annuelles du NIVA, de l'enfoncement (maximal, moyen et cumulatif), de l'enneigement (maximal, moyen et cumulatif), du nombre de jours avec un enfoncement de plus de 50 cm (moyen et cumulatif), du nombre de jours avec un enneigement de plus de 50 cm (moyen et cumulatif) et, finalement, sur le nombre de jours entre le premier et dernier relevé. L'année a été utilisée comme facteur aléatoire dans tous les modèles,

Données bimensuelles

Par la suite, des modèles similaires ont été refaits, avec les mêmes variables prédictives et le même facteur aléatoire, mais avec seulement l'enfoncement et l'enneigement comme variables dépendantes, pour évaluer ces relations sur une base bimensuelle. Les autres variables réponses n'ont pas été utilisées étant donné qu'elles dépendent du temps et que celui-ci n'est pas exactement constant entre les relevés,

Aussi bien pour les analyses annuelles que bimensuelles, l'effet quadratique de la variable altitude a été testée pour déterminer la présence d'un seuil, puis des modèles avec et sans interactions entre les variables prédictives ont été construits. Le critère d'information d'Akaike (AIC_c) corrigé selon la taille réelle de l'échantillon (Lebreton et coll., 1992) a été utilisé pour

sélectionner le meilleur modèle (plus faible AIC_c) et classer les autres modèles selon leur déviation relative par rapport au meilleur modèle (ΔAIC_c),

Relations entre les caractéristiques physiques et les données météorologiques des stations météorologiques et l'enfoncement calculé aux stations de règles à neige

La même méthode a été utilisée pour déterminer le lien entre les données collectées aux stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada et l'enfoncement mesuré à la station de règles à neige du MFFP la plus proche. Cette analyse a été réalisée en utilisant seulement l'enfoncement comme variable dépendante, car c'est la seule variable employée dans le calcul du NIVA. Cette analyse permet d'évaluer la possibilité d'obtenir un indice de rigueur hivernale semblable à l'indicateur NIVA au cœur d'un ravage en utilisant des données provenant de stations météorologiques,

Dans les modèles, en plus du mois, de l'altitude, de la longitude et de la latitude, les variables prédictives suivantes, mesurées aux stations météorologiques, ont été considérées : l'épaisseur de neige au sol, la température (moyenne, maximale et minimale) et la quantité de précipitations sous forme de pluie. L'année a été utilisée comme facteur aléatoire et l'enfoncement à la station de règles à neige la plus proche comme variable réponse. L'effet des variables explicatives a été évalué de deux manières, soit en utilisant les valeurs (1) cumulatives ou (2) moyennes de la neige, la température et la pluie pour une période rétroactive allant de la journée précédant la lecture d'enfoncement jusqu'au début de l'hiver. De plus, nous avons testé les effets quadratiques de l'altitude, qui pourrait signifier qu'il tombe plus de neige au sommet d'une montagne qu'en bas, les effets racine carrée de l'abondance de neige au sol, qui pourrait impliquer qu'une même augmentation de neige a un effet plus grand lorsqu'il y a peu de neige au sol, et les effets racines cubique de la température, pour la même raison que la racine carrée mais étant donné le signe négatif pour plusieurs valeurs de température, la racine carrée n'est pas possible. La relation racine carrée de l'abondance de neige au sol et racine cubique de la température est utilisée pour prédire la densité de la neige en Russie et au Japon (Meløysund et coll., 2007). Ces effets permettent d'évaluer la présence de différents seuils et ainsi d'obtenir la relation la plus réaliste possible et prévoir la rigueur hivernale. La sélection de modèles a été effectuée à l'aide de l'approche AIC_c , décrite plus haut,

Projection de l'indice de rigueur hivernale jusqu'en 2100

Nous avons estimé les valeurs climatiques quotidiennes futures de quantité de pluie, d'abondance de neige au sol et de température en utilisant des modèles de la cinquième phase du « Coupled Model Intercomparaison Project » (CMIP5) produits par le « Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC; IPCC 2013, Jenouvrier 2013). Nous avons utilisé les données de conditions météorologiques observées aux stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada pour corriger les biais dans les modèles climatiques en utilisant une analyse quantile avec une fenêtre mobile (Cannon et coll., 2015). Cette méthode calcule la différence, pour chaque percentile, entre la fonction de répartition (« cumulative distribution function [CDF] ») des données observées et celle de la simulation pour ces mêmes données pour ensuite appliquer ce biais à la simulation future. La fenêtre mobile est centrée sur chaque journée et calcule la moyenne des données des jours avant et après. Cela permet d'éviter des changements abrupts dans les données.

Afin de considérer les incertitudes dans les modèles, nous avons utilisé deux forçages radiatifs : le « Representative Concentration Pathway » 4,5 (RCP4,5) et 8,5 (RCP8,5). Ces forçages correspondent à deux trajectoires différentes de concentrations des gaz à effet de serre jusqu'en 2100 qui anticipent l'évolution socio-économique globale influençant l'émission des gaz et les changements climatiques. Par exemple, le scénario RCP8,5 assume une trajectoire exponentielle de l'émission des gaz à effet de serre jusqu'en 2100 (Riahi et coll., 2011) tandis que le scénario RCP4,5 suppose qu'elle se stabilisera au milieu du siècle (Thompson et coll., 2011). L'utilisation de plusieurs scénarios de changements climatiques est importante pour évaluer l'étendue des effets potentiels des changements climatiques (Moss et coll., 2010).

Nous avons utilisé 10 simulations provenant de cinq modèles globaux climatiques pour considérer les incertitudes dans les projections climatiques (p.ex, les circulations océaniques et atmosphériques, l'utilisation et la gestion du territoire) et les variations naturelles du climat (Jenouvrier et coll., 2012). Précisément, nous avons lissé les données provenant de chacune de ces simulations en utilisant un « Gaussian kernel smoother » avec un paramètre de lissage de 2 (Jenouvrier et coll., 2009). Par la suite, nous les avons utilisées pour projeter l'indice de rigueur hivernale à partir de la formule 1 jusqu'en 2100.

Comparaison de la fiabilité de l'indicateur NIVA et de l'indice de rigueur hivernale pour la gestion du cerf de Virginie

Nous avons comparé la relation entre l'indicateur NIVA ou l'indice de rigueur hivernale calculé à partir de la formule 1 (voir plus bas) et trois variables : (1) la mortalité hivernale dans quatre ravages (Island Brook, Vénosta, Pohénégamook et Armstrong), (2) la récolte de mâles adultes et (3) le nombre d'accidents routiers provenant des données de la Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ). La mortalité hivernale dans les quatre ravages pour certaines années entre 1976 et 1988 provient des données tirées de Potvin et Breton (1992) tandis que les deux autres variables ont été fournies par le MFFP et le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Éducation des transports (MTMDET). La variation de la récolte de mâles adultes reflète bien la variation de la densité de la population de cerfs (Potvin 1989). Nous avons donc calculé la variation annuelle de la récolte par rapport à celle de l'année précédente ou par rapport à la moyenne des trois années précédentes (Potvin et Breton 1992). La même variation a également été évaluée pour les accidents routiers. Nous avons utilisé le coefficient de corrélation (R^2) pour comparer les deux indicateurs. Cette analyse permet d'évaluer la justesse et la fiabilité de l'indice de rigueur hivernale par rapport à l'indicateur NIVA.

Résultats et discussion

En tout, 776 données annuelles et 8320 données bimensuelles ont été considérées pour l'ensemble des 30 stations de règles à neige du MFFP. Les 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada ont fourni un équivalent de 363 879 journées de données.

Relations entre l'indicateur NIVA, l'enfoncement et l'enneigement, et les caractéristiques physiques des stations de règles à neige

Données annuelles

Les variations de l'indice NIVA (Tableau 4), ainsi que de toutes les autres variables annuelles se rapportant à l'enfoncement et à l'enneigement aux stations de règles à neige (Annexes 1 à 11), étaient influencées par une interaction entre l'altitude, la longitude et la latitude des stations

échantillonnées. Par conséquent, la différence entre les données collectées aux stations météorologiques et aux règles à neige doit être en partie corrigée en tenant compte des effets des coordonnées géographiques et de l'altitude. Idéalement, cette correction devrait donc aussi être utilisée pour estimer les conditions dans les ravages à partir des conditions observées aux règles à neige.

Données bimensuelles

Les données d'enfoncement (Tableau 5), ainsi que d'enneigement (annexe 12), collectées de façon bimensuelle aux stations de règles à neige, étaient influencés par l'altitude, la longitude, la latitude et le mois. Par conséquent, ces variables peuvent être utilisées pour moduler les valeurs d'enfoncement de l'indicateur NIVA mesurées dans les stations de règles à neige pour prévoir la rigueur des conditions hivernales dans les ravages.

Comme les données de neige sont mesurées à proximité d'un ravage, mais pas directement dans celui-ci, les cerfs peuvent avoir à affronter des conditions différentes en hiver au cœur du ravage. En utilisant les résultats de ces premières analyses, il serait possible d'adapter l'indicateur NIVA au ravage en comparant ses coordonnées géographiques avec celles de la station de règles à neige. Cette solution permettrait d'améliorer la gestion du cerf en réduisant l'écart entre la rigueur hivernale mesurée aux stations à neige et celle qui prévaut dans les ravages. Il faudrait toutefois continuer à collecter des mesures de neige périodiquement au courant de l'hiver.

Relations entre les caractéristiques physiques des stations et les données des stations météorologiques et l'enfoncement calculé aux stations de règles à neige

Les variations de l'enfoncement calculé aux stations de règles à neige pouvaient être prédites à 79 % avec les variables mesurées aux stations météorologiques (Tableau 6, Figure 2) selon la formule 1 :

$$\ln(\text{Enfoncement}) = \tau + (\alpha^2 \sqrt{\text{Neige au sol}_t} + \beta^3 \sqrt{\text{Température moyenne}_{\text{début hiver}} + \gamma \text{Qtée pluie}_{\text{début hiver}}) * \delta \text{Mois} + \varepsilon \Delta \text{Altitude} + \zeta \Delta \text{Latitude} + \eta \Delta \text{Longitude}$$

où l'épaisseur de neige au sol au temps t est évaluée en centimètres, la température moyenne depuis le début de l'hiver au temps t en degrés C, la quantité moyenne de pluie tombée depuis le début de l'hiver au temps t en millimètres, la différence d'altitude en mètres, la différence de latitude et longitude en mètres (coordonnées UTM). De plus, Δ représente la différence entre les stations de règles à neige et les stations météorologiques. Les valeurs des paramètres se trouvent au Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres du modèle final de l'enfoncement du cerf de Virginie dans la neige.

Effet	Estimé	Erreur type	DDL	Valeur de T	P
Intercepte	1,8279000	0,035	3005	49,30	< 0,001
Neige	0,2523200	0,004	3005	60,94	< 0,001
Température	-0,0856080	0,017	3005	-8,69	< 0,001
Pluie	0,0009795	0,007	3005	-4,06	< 0,001
Janvier	0,0000001	0,076	3005	1,94	0,055
Février	0,0000030	0,118	3005	2,67	0,008
Mars	-0,0509170	0,164	3005	-15,60	< 0,001
Avril	0,6694200	0,335	3005	-10,20	< 0,001
Novembre	1,1613000	0,064	3005	-3,70	< 0,001
Décembre	0			NA	
Neige*Janvier	0,9166900	0,005	3005	0,01	< 0,001
Neige*Février	0,3074400	0,005	3005	0,01	< 0,001
Neige*Mars	-0,2874500	0,005	3005	0,01	< 0,001
Neige*Avril	-0,0560880	0,006	3005	0,01	< 0,001
Neige*Novembre	-0,1081500	0,014	3005	4,75	< 0,001
Neige*Décembre	0			NA	
Température*Janvier	-0,1057600	0,036	3005	-3,57	< 0,001
Température*Février	-0,0823800	0,055	3005	-4,01	< 0,001
Température*Mars	0,0477630	0,077	3005	-19,80	< 0,001
Température*Avril	0,0912710	0,161	3005	-10,40	< 0,001
Température*Novembre	0,1447700	0,028	3005	4,52	< 0,001
Température*Décembre	0			NA	
Pluie*Janvier	0,1803500	0,013	3005	-9,31	< 0,001
Pluie*Février	0,1725100	0,018	3005	-12,80	< 0,001
Pluie*Mars	0,0670950	0,026	3005	-6,49	< 0,001
Pluie*Avril	-0,1445900	0,052	3005	1,10	0,272
Pluie*Novembre	-0,1993300	0,013	3005	1,97	0,050
Pluie*Décembre	0			NA	
Altitude	-0,2043900	0,000	3005	31,90	< 0,001
Latitude	-0,0740000	0,038	3005	14,10	< 0,001
Longitude	0,0348780	0,019	3005	-12,90	< 0,001

La formule 1 prédit bien les conditions calculées aux stations à neige à partir de données provenant de stations météorologiques. La différence observée entre le NIVA et l'indicateur de rigueur pourrait être causée par la méthode utilisée pour les évaluer. En effet, le NIVA est calculé

à partir de données d'enfoncement mesurées toutes les deux semaines et extrapolées linéairement entre les relevés. La formule 1 évalue quotidiennement l'enfoncement en utilisant les données des stations situées à proximité des ravages mesurées tous les jours. Par conséquent, la formule 1 pourrait donner des résultats plus précis sur les conditions de rigueur hivernale réelle.

Tableau 4. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'indicateur NIVA annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent l'importance des interactions entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique de l'altitude a également été évalué, L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ² *(Lat+Long)	9	178 135,1	178 135,4	0,0	1,0
Alt ² *Long*Lat	8	183 198,4	183 198,6	5063,2	0,0
Alt ² +Long+Lat	4	201 866,7	201 866,8	23 731,4	0,0
Lat*Long	4	204 158,8	204 158,8	26 023,5	0,0
Lat+Long	3	206 471,9	206 472,0	28 336,6	0,0
Lat	2	228 024,0	228 024,0	49 888,7	0,0
Long	2	311 595,0	311 595,0	133 459,6	0,0
Alt ²	3	384 587,5	384 587,5	206 452,2	0,0
Alt	2	408 575,8	408 575,9	230 440,5	0,0
Intercept	1	416 828,3	416 828,3	238 692,9	0,0

Tableau 5. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt), des coordonnées géographiques (lat et long), du mois (Mois) et du jour dans l'année (Jour_jul) sur l'enfoncement à chacun des relevés ($n = 7132$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent l'importance des interactions entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt*(Lat+Long)*Mois	12	71 888,5	71 888,5	0	1
Alt*Lat*Mois	8	74 189,3	74 189,3	2300,7	0
Alt+Lat+Mois	4	77 416,1	77 416,1	5527,5	0
Alt*Long*Mois	8	79 036,2	79 036,3	7147,7	0
Alt+Long+Mois	4	81 865,6	81 865,6	9977,0	0
Alt ² *mois	6	84 533,2	84 533,2	12 644,6	0
Alt ² +mois	4	85 888,2	85 888,2	13 999,7	0
Mois	2	87 438,5	87 438,5	15 549,9	0
Jour_jul	2	100 017,0	100 017,0	28 128,4	0
Alt ² *(Lat+Long)	9	100 276,3	100 276,4	28 387,8	0

Tableau 6. Modèles évaluant la relation entre l'enfoncement à chacun des relevés ($n = 7132$) calculés à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015 et la neige au sol (N), la température moyenne (Tmoy), la quantité de pluie moyenne (Pmoy), le mois (Mois), l'altitude (Alt), la latitude (Lat), et la longitude (Long) provenant de 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada. Les variables ont également été calculées rétroactivement de 1 semaine (_1) jusqu'au début de l'hiver (_h). Le signe Δ représente la différence entre la station météorologique et le ravage. Certains modèles testent l'importance des interactions entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet racine carrée ($\sqrt{}$) et cubique ($\sqrt[3]{}$) ont également été évalués. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	Δ AICc	Poids de l'AICc
$(\sqrt{N} + \sqrt[3]{Tmoy_h} + Pmoy_h)^*$ Mois + Δ Alt + Δ Lat + Δ Long	31	18 538,4	18 538,8	0	1
$(\sqrt{N_h} + \sqrt[3]{Tmoy_h} + Pmoy_h)^*$ Mois + Δ Alt + Δ Lat + Δ Long	31	19 834,3	19 834,9	1295,9	0
$(N_h + Tmoy_h + Pmoy_h)^*$ Mois + Δ Alt + Δ Lat + Δ Long	31	19 883,8	19 884,3	1345,4	0
$(N_h + Tmoy_h + Pmoy_h)^*$ Mois + Δ Alt	29	20 092,3	20 092,7	1553,8	0
$(N_h + Tmoy_h + Pmoy_h)^*$ Mois	28	21 273,9	21 274,2	2735,4	0
N_h + Tmoy_h + Pmoy_h	4	26 966,1	26966,	8427,3	0
N_h + Tmoy_h	3	29 647,9	29 647,9	11 109,0	0
N_h	2	38 527,7	38 527,7	19 988,8	0
N_3	2	44 035,2	44 035,2	25 496,4	0
N_2	2	44 243,5	44 243,5	25 704,7	0
N_1	2	44 406,2	44 406,2	25 867,4	0

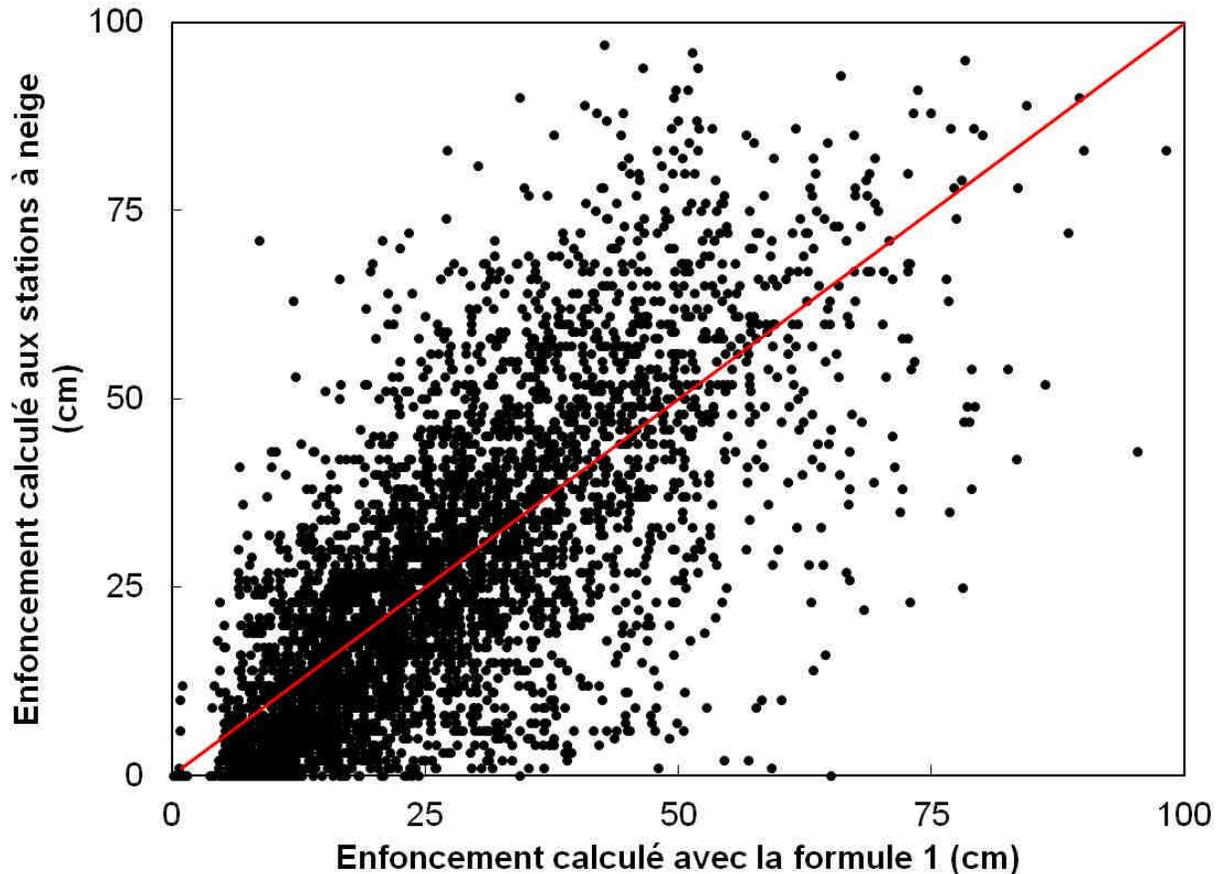


Figure 2. Relation entre l'enfoncement observé de façon bimensuelle dans 30 stations du MFFP munies de règles à neige de 1975 à 2015 et l'enfoncement calculé à partir de 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada selon la formule 1 pour le sud du Québec. Le modèle inclut une interaction entre l'épaisseur de neige au sol, la température moyenne, la pluie, le mois, l'altitude, la latitude et la longitude. La ligne rouge correspond à une relation parfaite.

Il y a un écart moyen de 20 % entre le NIVA calculé dans les stations à neige et l'indice de rigueur hivernale calculé selon la formule 1 de 2008 à 2015. Cet écart varie selon les stations de règles à neige (Tableau 7, Figure 3). La moyenne des écarts en valeur non absolue pour l'ensemble des stations est de 0,0053 %, ce qui suggère que la formule 1 ne biaise pas systématiquement les données. De plus, la probabilité de classer l'indice de rigueur hivernale calculé avec la formule 1 dans la même catégorie de rigueur des conditions hivernales (facile [< 3000], intermédiaire [$> 3000, < 5000$] ou difficile [> 5000]) que le NIVA calculé aux stations de règles à neige est élevée (Tableau 8). Comme l'indicateur NIVA estime lui aussi l'enfoncement, la différence observée ne représente pas nécessairement une erreur de l'indice de rigueur hivernale. En effet,

la formule développée à partir des données météorologiques pourrait permettre d'améliorer cet indice afin de mieux refléter les conditions réelles.

Tableau 7. Différence moyenne entre le NIVA mesuré dans chacune des stations de règles à neige et l'indice de rigueur hivernale calculé selon la formule 1 entre 2008 et 2015.

Station de règles à neige	Station météo utilisée dans la formule 1	Valeur absolue de la moyenne des écarts (%)
Armagh	Saint-Michel	14,3
Armstrong	Saint-Théophile	25,2
Ashberish	Rivière-du-Loup	27,1
Calway	Vallée-Jonction	17,9
Cap-Santé	Deschambault	38,6
Cascapédia	Charlo Auto	11,7
Causapscal	Causapscal	9,4
Chertsey	St-Hippolyte	20,0
Duchénier	Lac Humqui	29,0
Duhamel	Chénéville	32,4
Gaspé	Gaspé A	21,6
Golf du Grand-Portneuf	Sainte-Christine	16,9
Grande-Rivière	Sainte-Lucie	23,4
Hemmingford	Hemmingford 4 Winds	24,0
Hillhead	Lachute	10,3
Island-Brook	Sawyerville Nord	18,2
Knowlton	Sutton	20,6
Lady Smith	Charteris	13,6
La-Louise	Lac-Mégantic 2	10,3
Lac Meech	Luskville	23,3
Maniwaki	Ottawa Int A	31,3
Pohénégamook	Rivière-du-Loup	18,7
St-Calixte	Saint-Hippolyte	24,2
Sainte-Anne-des-Monts	Causapscal	18,4
Sainte-Christine	Saint-Nazaire	10,4
Sainte-Eulalie	Arthabaska	37,1
Saint-Jacques-de-Leeds	Saint-Pierre-de-Broughton	16,2
Tawachiche	Lac-aux-Sables	14,8
Venosta	Charteris	23,6
Watopéka	Bromptonville	18,8
Moyenne		20,7

* La valeur non absolue de la moyenne des écarts pour l'ensemble des stations est de 0,0053 %.

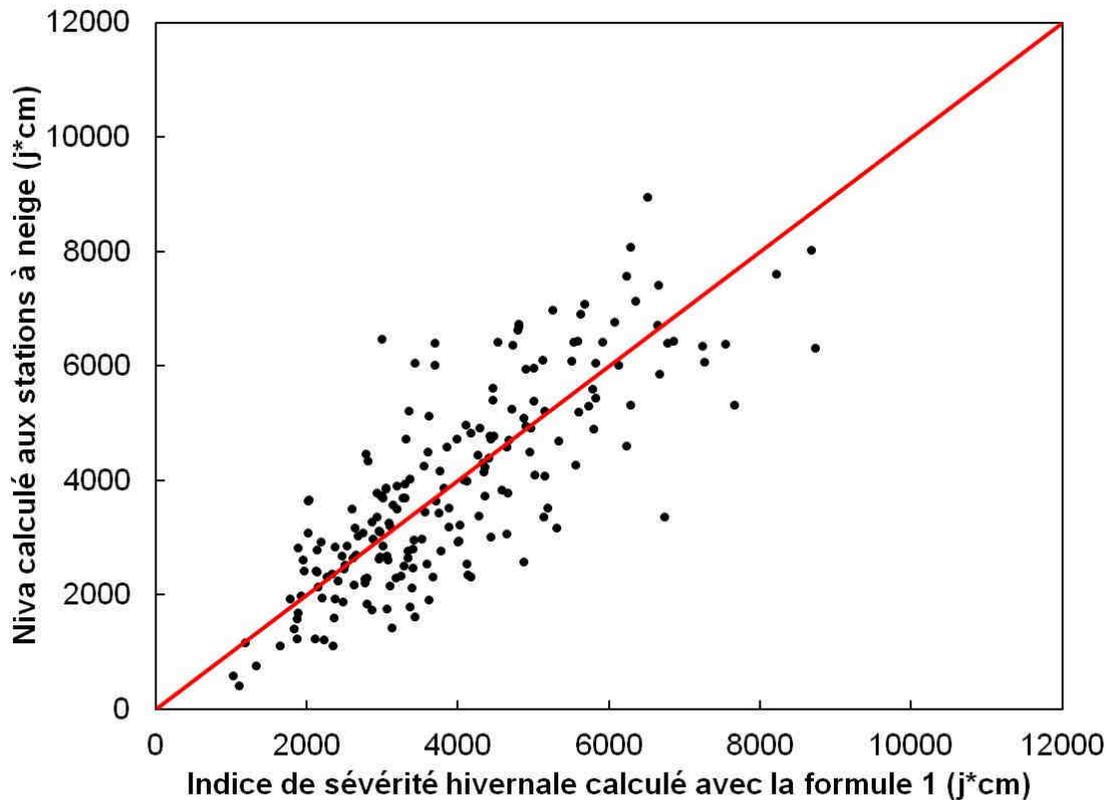


Figure 3. Relation entre le NIVA calculé dans 30 stations munies de règles à neige de 2008 à 2015 et l'indice de rigueur hivernale calculé à partir de 46 stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada selon la formule 1 pour le sud du Québec. Le modèle inclut une interaction entre l'épaisseur de neige au sol, la température moyenne, la pluie, le mois, l'altitude, la latitude et la longitude, La ligne rouge correspond à une relation parfaite.

Tableau 8. Probabilité (en pourcentage) de classer l'indice de rigueur hivernale calculé avec la formule 1 dans trois niveaux de rigueur (facile < 3000, intermédiaire = 3000 à 5000, difficile > 5000) selon le classement du NIVA calculé aux 30 stations de règles à neige de 2008 à 2015.

NIVA calculé aux stations à neige	Indice de rigueur hivernale calculé selon la formule 1		
	Facile	Intermédiaire	Difficile
Facile	84	16	0
Intermédiaire	18	75	6
Difficile	2	33	65

Comparaison entre l'indicateur NIVA et l'indice de rigueur hivernale déterminé à partir des stations météorologiques

Mortalité dans quatre ravages

La relation entre le pourcentage de mortalité des cerfs dans quatre ravages et l'indice de rigueur hivernale était plus forte pour celui calculé à partir de la formule 1 que le NIVA calculé aux stations à neige (Figure 4). Ces résultats suggèrent que l'indicateur de rigueur hivernale calculé à partir de la formule 1 représente mieux les conditions hivernales réelles vécues par le cerf et permet une meilleure estimation du taux de mortalité.

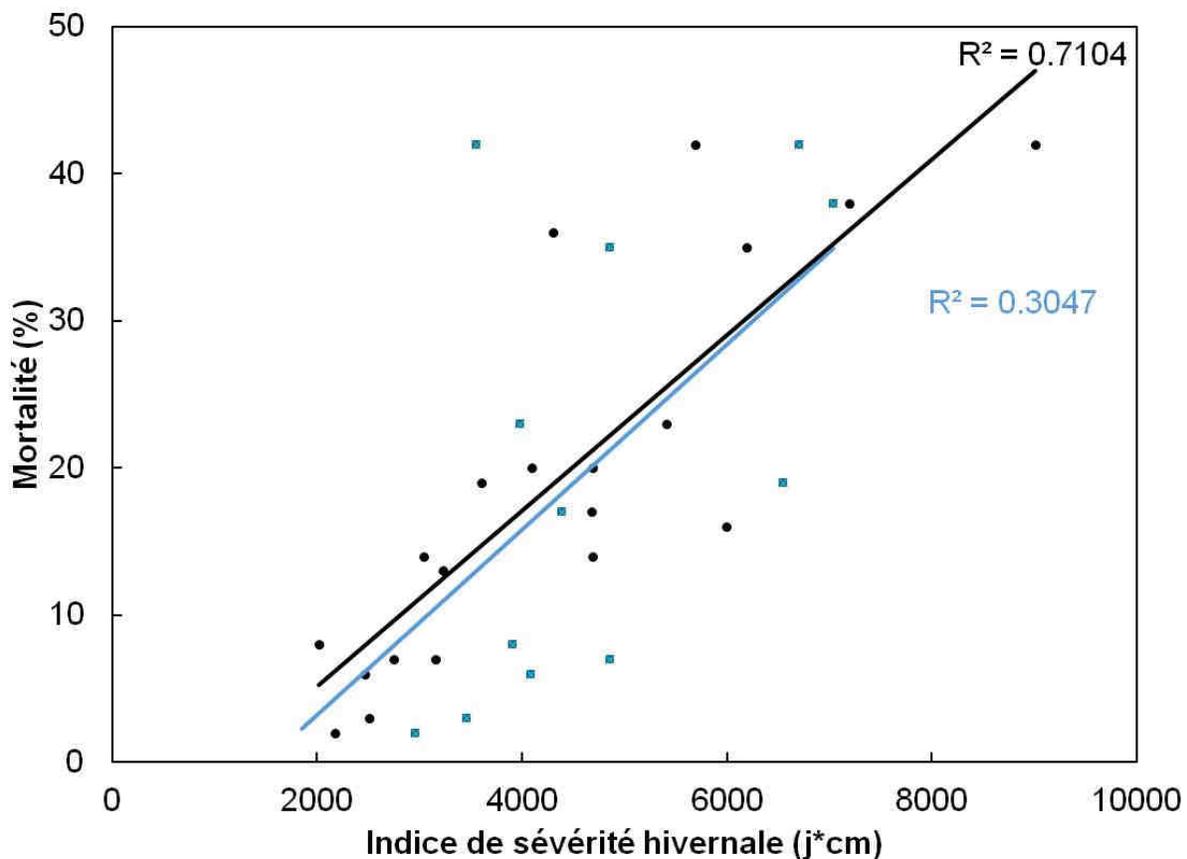


Figure 4. Relation entre l'indice de rigueur hivernale et le taux de mortalité des cerfs dans quatre ravages du Québec, Les deux indices présentés sont : le NIVA calculé à partir des stations à neige (carrés, bleu) et l'indice calculé selon la formule 1 (cercles, noir).

Variation de la récolte des mâles adultes à la chasse sportive

La relation entre la variation de la récolte de mâles adultes par rapport à l'année précédente et l'indice de rigueur hivernale était, en moyenne, légèrement plus forte pour celui calculé à partir de la formule 1 que pour le NIVA calculé aux stations à neige (Tableau 8). La différence entre les indices de rigueurs et la variation de la récolte par rapport aux trois années précédentes était similaire. Ce résultat laisse de nouveau supposer que l'indice de rigueur hivernale calculé avec la formule 1 explique mieux la mortalité des cerfs que l'indicateur NIVA.

Tableau 9. Coefficient de détermination entre la variation de la récolte par rapport à celle de l'année précédente et le NIVA mesuré dans les stations à neige ou l'indice de rigueur hivernale déterminé selon la formule 1 par zone de chasse.

Zone de chasse	R² pour le NIVA calculé aux stations à neige	R² pour l'indice de rigueur hivernale calculé selon la formule 1
1	0,11	0,75
2e	0,16	0,32
2o	0,14	0,45
3e	0,22	0,47
3o	0,04	0,20
4	0,36	0,67
5e	0,55	0,49
5o	0,59	0,53
6n	0,46	0,66
6s	0,71	0,71
7n	0,22	0,73
7s	0,80	0,27
8e	0,00	0,00
8n	0,61	0,78
8s	0,00	0,01
9o	0,47	0,54
9e	0,22	0,50
10e	0,80	0,84
10o	0,60	0,61
26e	0,30	0,46
27o	0,32	0,37
Moyenne	0,37	0,49

Accidents routiers

Nous n'avons pas observé de relation entre la variation du nombre d'accidents routiers par rapport à celui de l'année précédente et le NIVA calculé aux stations à neige (Figure 5) ou l'indice de rigueur hivernale calculé à partir de la formule 1 (Figure 6). Malgré que le nombre d'accidents routiers avec le cerf augmente avec sa densité (Hothorn et coll., 2015), le nombre d'accidents enregistrés annuellement peut ne pas représenter le nombre réel, car certains cerfs peuvent avoir été récoltés par les résidents locaux avant leur comptabilisation, projetés loin de la route ou sont allés mourir plus loin à la suite de la collision (Finder et coll., 1999). De plus, la SAAQ n'enregistre pas les accidents avec la faune dont les dommages matériels ou corporels sont évalués à moins de 1000 \$ et 2000 \$ avant ou après mars 2010, respectivement. Avant 2010, les données ne distinguent pas l'espèce impliquée dans l'accident bien que le cerf de Virginie soit l'espèce la plus abondante dans les milieux habités et conséquemment le plus susceptible d'être impliquée dans ces accidents. Ces spécificités pourraient expliquer l'absence de relation observée avec la rigueur hivernale,

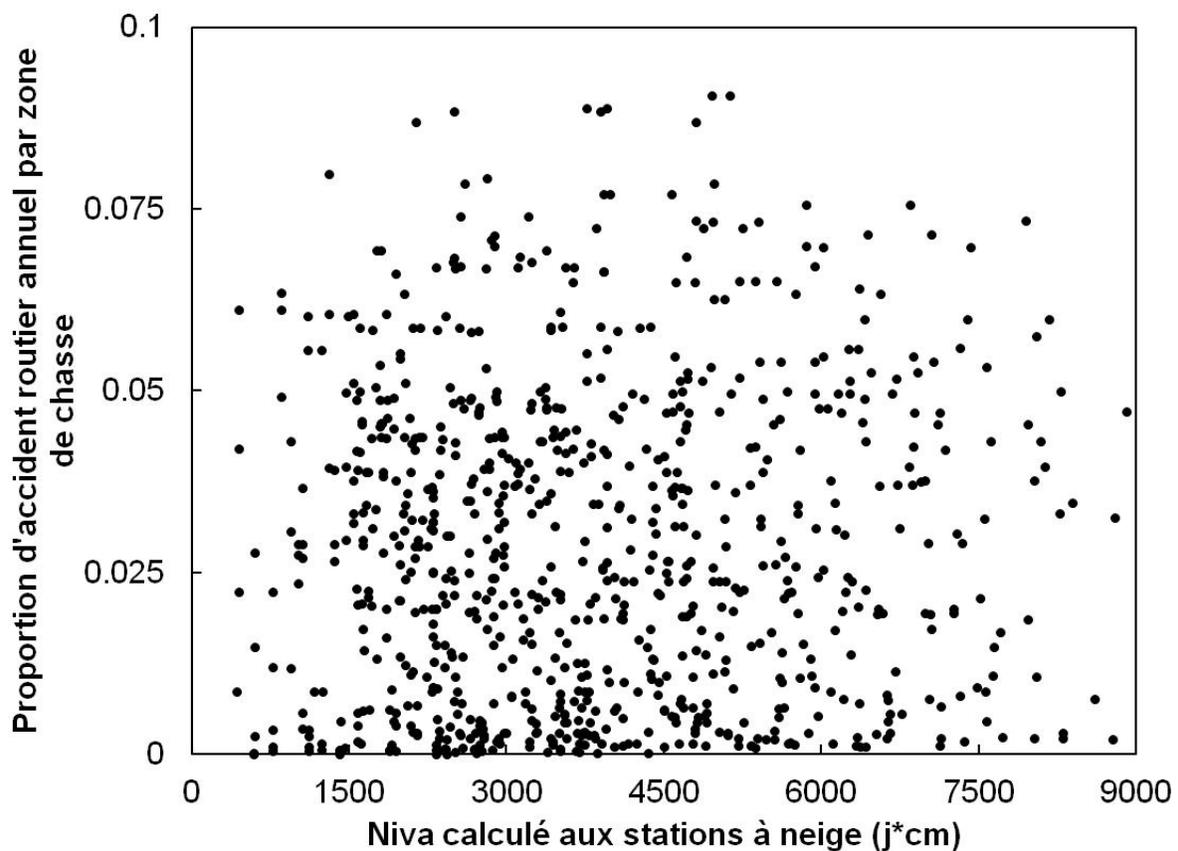


Figure 5. Relation entre le NIVA calculé aux stations à neige et la proportion d'accidents routiers annuels par zone de chasse au Québec.

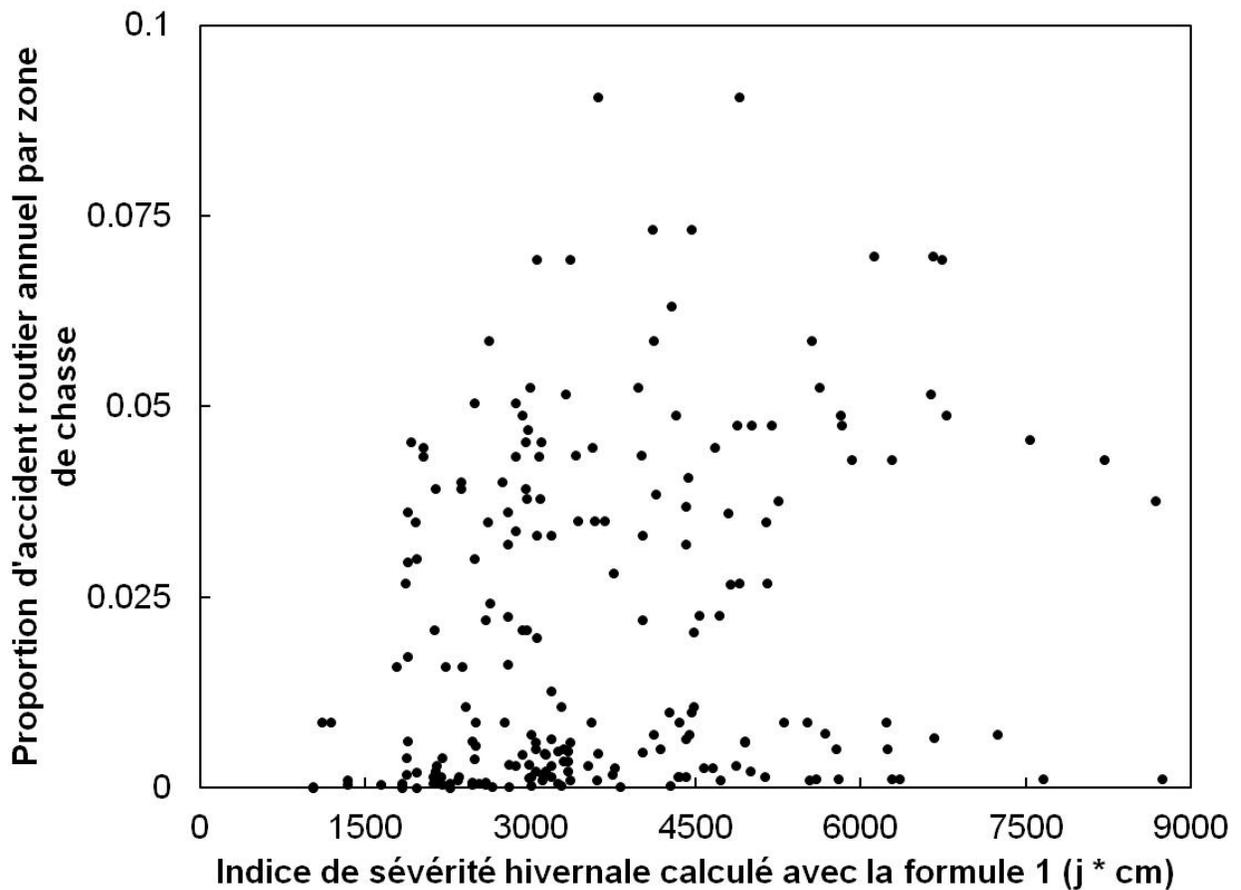


Figure 6. Relation entre l'indice de rigueur hivernale et la proportion d'accidents routiers annuels par zone de chasse au Québec.

Projection de l'indice de rigueur hivernale jusqu'en 2100

L'indice de rigueur hivernale devrait diminuer au courant des prochaines années puis se stabiliser vers 2090 (Figure 7). Par contre, cette diminution n'est pas constante et les conditions devraient devenir plus strictes selon les années. De plus, l'indice pourrait demeurer supérieur à 3000 $j^* cm$, la limite à laquelle un hiver est considéré comme facile pour le cerf, pour plusieurs ravages. Bien que les conditions hivernales fussent s'améliorer pour le cerf au Québec, elles pourraient rester limitantes dans plusieurs ravages actuels au Québec d'ici à 2100 (Tableau 10). De plus, les changements climatiques devraient améliorer les conditions environnementales vers le nord (Chen et coll., 2011) et les cerfs pourraient être exposés aux conditions hivernales actuelles dans

leurs futurs ravages situés plus au nord (La Sorte et Jetz 2012). Par conséquent, il est important de conserver un bon abri dans les ravages pour maintenir les populations de cerfs dans les régions où la rigueur de l'hiver demeurera un facteur limitant. Le nouvel indicateur de rigueur hivernale développé dans ce document pourrait donc être utile pour améliorer la gestion du cerf de Virginie partout au Québec.

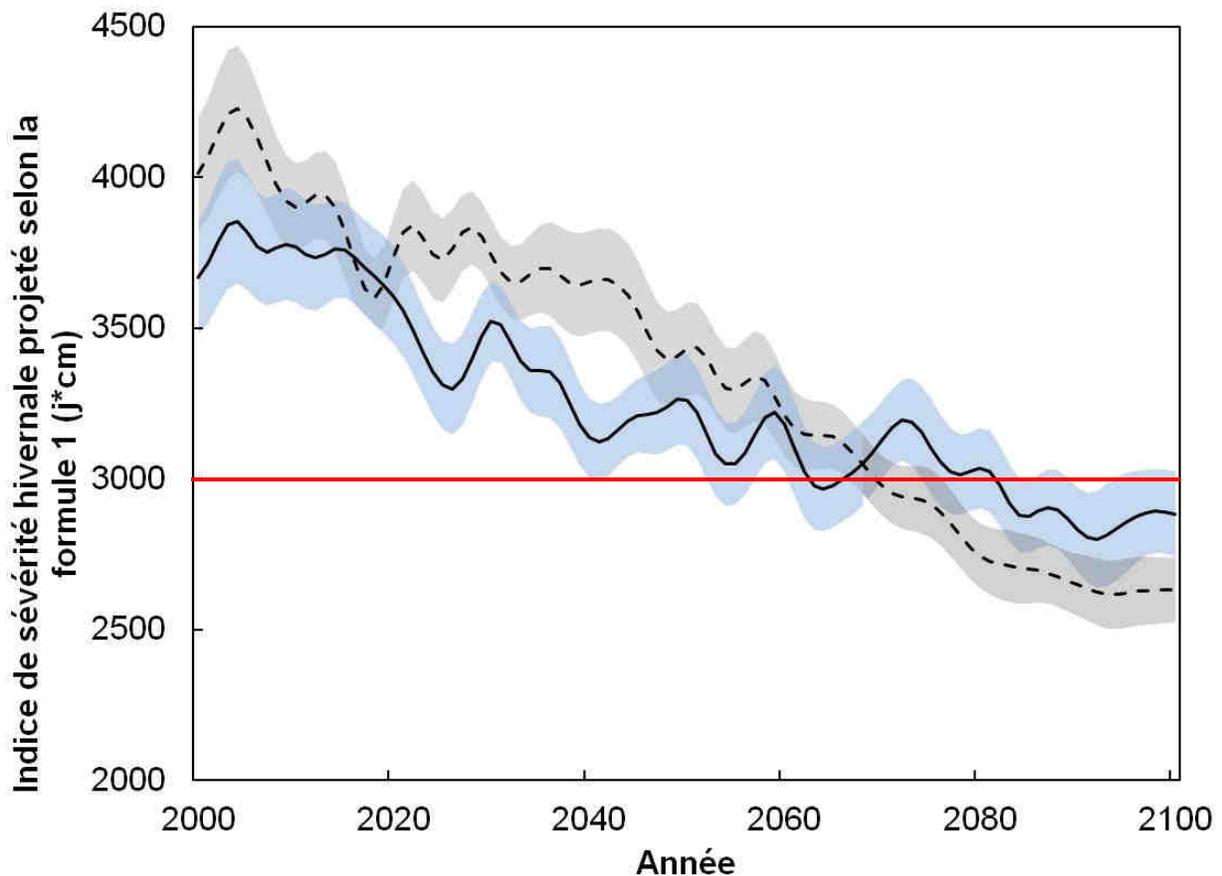


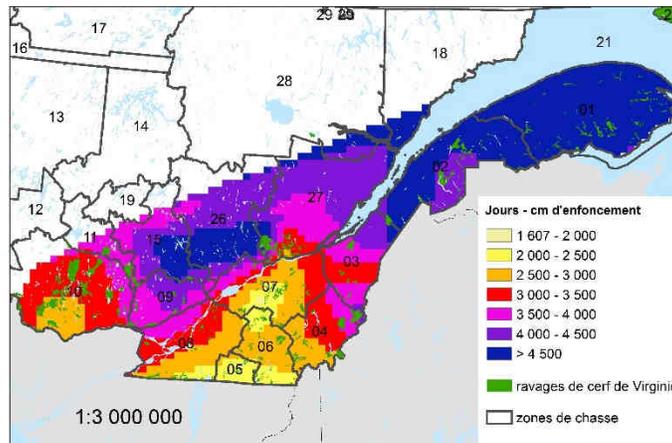
Figure 7. Moyenne des projections de l'indice de rigueur hivernale moyen lissé calculé selon la formule 1 jusqu'en 2100 produit à partir de prévision météorologique venant de 5 modèles CIMP5 forcés selon les scénarios RCP4,5 (ligne pleine) ou RCP8,5 (ligne pointillée) pour l'ensemble des 30 ravages. Les intervalles de confiance à 95 % sont présentés en bleu (RCP4,5) et gris (RCP8,5). La ligne rouge représente la limite supérieure d'un hiver considéré comme facile pour le cerf de Virginie.

Tableau 10. Projection de l'indice de rigueur moyen lissé calculé selon la formule 1 en 2100 pour chacun des ravages produit à partir de prévision météorologique venant de 5 modèles CIMP5 forcés selon les scénarios RCP4,5 ou RCP8,5.

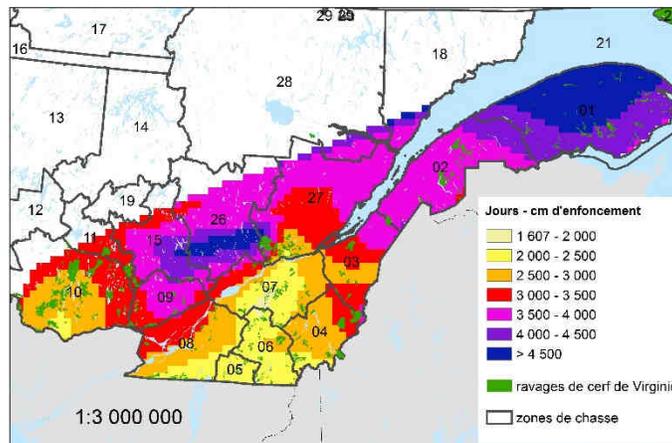
Ravage	RCP4,5		RCP8,5	
	2016	2100	2016	2100
Armagh	4701	3682	4611	3281
Armstrong	2875	2090	2565	2410
Asberish	3911	2957	3814	2498
Calway	3813	2980	3798	2732
Cap-Santé	2683	2040	2343	1606
Cascapédia	4894	3664	4737	3090
Causapscal	5075	3902	4974	3248
Chertsey	5112	3900	5475	4129
Duchénier	4803	3593	4728	2905
Duhamel	3659	2800	3601	2683
Gaspé	4838	3525	4673	2880
Golf GP	3724	2792	3919	2741
Grande-Rivière	5085	3611	5130	3435
Hemmingford	2045	1748	2195	1747
Hillhead	3560	2851	3572	2685
Island Brook	2290	1887	2348	1889
Knowlton	1943	1621	1987	1537
Lac-Louise	2935	2305	3043	2368
Lac Meech	2472	2005	2340	1761
Lady Smith	3343	2741	3307	2532
Maniwaki	3074	2579	3070	2416
Pohénégamook	4426	3326	4348	2854
Saint-Calixte	4066	3258	4211	3172
Sainte-Anne	6893	5048	6517	3440
Sainte-Christine	2687	2249	2771	2202
Sainte-Eulalie	1887	1516	2066	1581
Saint-Jacques	2964	2294	2874	2115
Tawachiche	5834	4393	6089	4108
Venosta	3510	2772	3489	2643
Watopéka	2897	2351	2908	2282

A. RCP4.5

2016



2050



2100

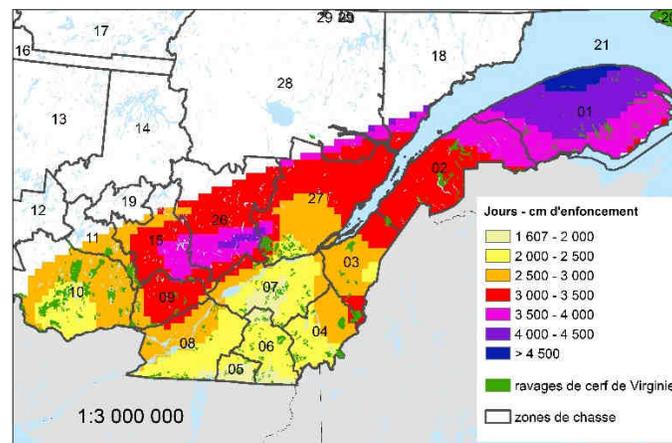
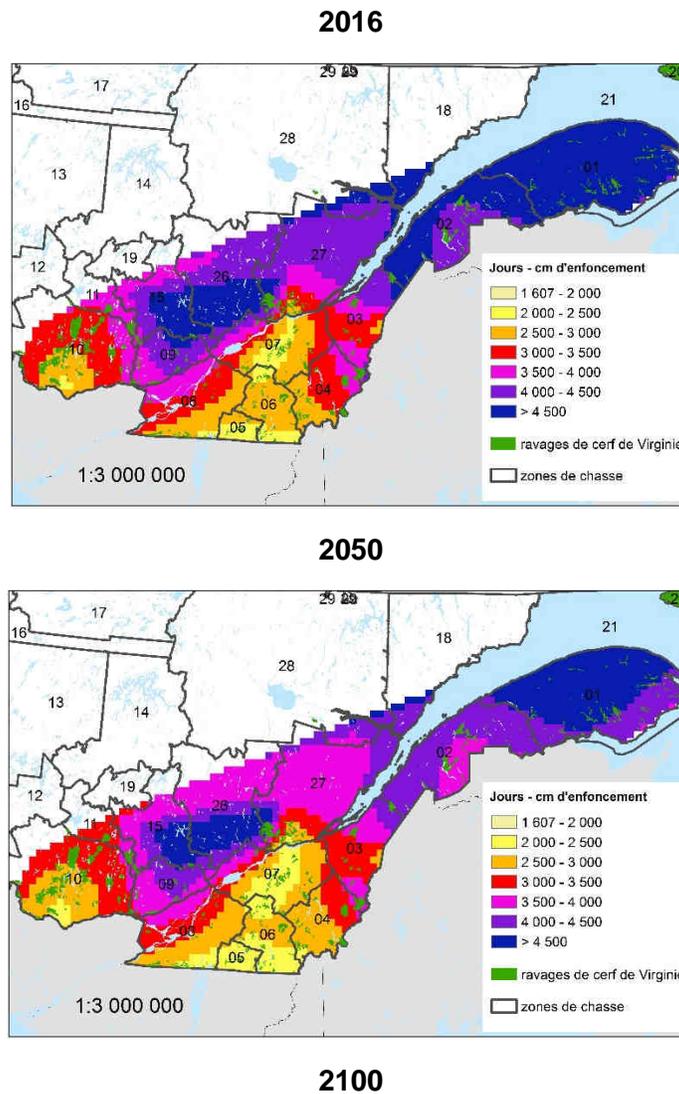


Figure 8. Indice de rigueur hivernale pour le cerf de Virginie en 2016, 2050 et 2100 produit à partir de prévision météorologique venant de 5 modèles CIMP5 forcés selon les scénarios RCP4,5 (A) ou RCP8,5 (B) pour le Québec méridional.

B. RCP8.5



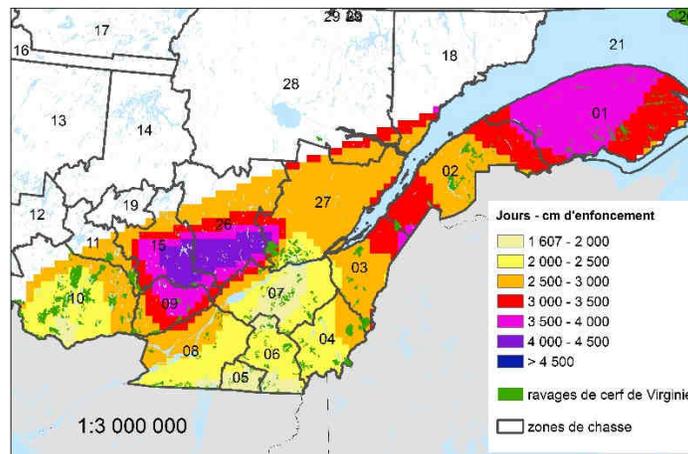


Figure 8. (Suite).

Conclusion

Selon les projections de l'indice de rigueur hivernale, les hivers devraient devenir plus cléments pour les cerfs de Virginie au courant du prochain siècle. Par contre, certaines années devraient connaître une augmentation de la rigueur et en 2100 les conditions pourraient toujours être difficiles pour plusieurs ravages au Québec. De plus, l'une des conséquences possibles du réchauffement global est la poursuite de l'expansion nordique du cerf de Virginie. Par conséquent, de nouveaux ravages pourraient apparaître vers le nord, affichant des conditions hivernales semblables à ce qui est actuellement observé dans le sud du Québec. Un indice de rigueur hivernale devrait donc être utile à court, moyen et long terme dans la gestion de cette espèce au Québec.

En utilisant les données provenant de 46 stations météorologiques gérées par Environnement et Changement climatique Canada, nous avons élaboré un modèle permettant de prédire l'enfoncement du cerf dans la neige à d'autres endroits dans le sud du Québec. Ce modèle permet, entre autres, d'évaluer un indice de rigueur des conditions hivernales comparable à l'indicateur NIVA. De plus, ce nouvel indicateur évalue la rigueur de l'hiver plus précisément que le NIVA. Les stations météorologiques sont également distribuées plus uniformément sur le territoire que les stations de règles à neige. Par conséquent, il est possible d'utiliser les données provenant des stations situées à proximité des ravages ainsi que d'autres stations bien réparties dans les zones de chasse afin d'augmenter la portée de cet indicateur. Les données de ces stations météorologiques sont disponibles gratuitement et sont mise à jour quotidiennement sur le site :

http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html#stnNameTab

En plus d'offrir une précision acceptable et supérieure, cette nouvelle méthode offre plusieurs avantages logistiques et financiers. En effet, il n'est pas nécessaire de se rendre sur le terrain à plusieurs reprises au courant de l'hiver, ce qui réduit la logistique et les coûts associés à l'utilisation de l'indicateur NIVA. De plus, la méthode actuellement utilisée pour calculer l'indice NIVA extrapole de manière linéaire l'enfoncement mesuré entre deux relevés, sans prendre en considération les variations réelles des conditions météorologiques entre ceux-ci. Puisque les relevés sont faits environ toutes les deux semaines, cela constitue sans aucun doute une limite

importante à la précision de cet estimateur. L'utilisation de notre formule permet de calculer l'indice de rigueur hivernale quotidiennement et donc d'obtenir une meilleure précision qui tient également compte des variations fines de la rigueur des conditions hivernales.

Afin de simplifier l'utilisation de cette nouvelle méthode, la formule a été implantée dans un chiffrier Excel et est disponible pour les biologistes gestionnaires de cette ressource. Après avoir sélectionné la station météorologique située le plus près du ravage, il suffit de remplir quelques cases (en jaune dans le fichier) pour calculer l'enfoncement quotidien :

- 1- L'altitude de la station météorologique
- 2- L'altitude au centre du ravage
- 3- La latitude et la longitude de la station météorologique
- 4- La latitude et la longitude au centre du ravage
- 5- Les données quotidiennes de pluie, de température moyenne et de neige au sol téléchargées du site d'Environnement et Changement climatique Canada.

La latitude et la longitude doivent être en mètres (p. ex. UTM 286620; 5 174 250). Si ces données sont en degrés minutes secondes (p. ex. 45° 12' 4,56'') ou en degrés décimaux (p. ex. 45,12345; -72,12345) deux onglets ont été ajoutés dans le fichier pour les convertir, rapidement et simplement, en mètres.

Nous croyons que cette méthode, relativement simple d'utilisation, peut être utilisée pour évaluer la rigueur des conditions hivernales pour les cerfs de Virginie au Québec et ainsi devenir un outil supplémentaire de choix pour gérer de cette espèce.

Références

- BILELLO, M.A. (1969). "Relationships between climate and regional variations in snow-cover density in North America", *Physics of Snow and Ice*, 1: 1015-1028.
- BUNNELL, F. L. et G. W. JONES (1984). "Black-tailed deer and lod-growth forests - a synthesis", dans W.R. Meehan, T.R. Merrell Jr et T.A. Hanley (éditeurs), *Fish and Wildlife Relationships in Old-growth Forests*, Bookmasters, Ashland, pp. 411-420.
- BUNNELL, F. L., F.W. HOVEY, R. S. McNAY et K. L. PARKER (1990a). "Forest cover, snow conditions, and black-tailed deer sinking depths", *Canadian Journal of Zoology*, 68 : 2403-2408.
- BUNNELL, F. L., K. L. PARKER, R. S. McNAY et F.W. HOVEY (1990b). "Sinking depths of black-tailed deer in snow, and their indices", *Canadian Journal of Zoology*, 68:917-922.
- CANNON, A. J., S. R. SOBIE et T. Q. MURDOCK (2015). "Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?", *Journal of Climate*, 28: 6938-6959.
- CHAUMOND, D. et R. D. BROWN (2010). "Analysis of regional climate model simulations of transport-related climate indices over southern Quebec", *Routes/Roads*, 345: 78-83.
- CHEN, I.-C., J. K. HILL, R. OHLEMÜLLER, D. B. ROY et C. D. THOMAS (2011). "Rapid range shifts of species associated with associated with high levels of climate warming", *Science*, 333: 1024-1026.
- CÔTÉ, S. D., T. P. ROONEY, J.-P. TREMBLAY J, C. DUSSAULT et D. M. WALLER (2004). "Ecological impacts of deer overabundance", *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 35: 113-147.
- CRÊTE, M. et F. GOUDREAU (1974). *Normes appliquées aux mesures de l'enneigement dans les aires d'hivernage du cerf de Virginie*, ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, 11 p.
- DAWE, K. L., E. M. BAYNE et S. BOUTIN (2014). "Influence of climate and human land use on the distribution of white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) in the western boreal forest", *Canadian Journal of Zoology*, 92: 353-363.
- DELGIUDICE, G. D. (1998). "Surplus killing of white-tailed deer by wolves in northcentral Minnesota", *Journal of Mammalogy*, 79: 227-235.

- DELGIUDICE, G. D., J. R. FIEBERG et B. A. SAMPSON (2013). "A Long-Term Assessment of the Variability in Winter Use of Dense Conifer Cover by Female White-Tailed Deer", *PLoS ONE*, 8(6): e65368.
- DELGIUDICE, G. D., M. R. RIGGS, P. JOLY et W. PAN (2002). "Winter severity, survival, and cause-specific mortality of female white-tailed deer in north-central Minnesota", *Journal of Wildlife Management*, 66: 698-717.
- FINDER, R. A., J. L. ROSEBERRY et A. WOOLF (1999). "Site and landscape conditions at white-tailed deer/vehicle collision locations in Illinois", *Landscape and Urban Planning*, 44: 77-85.
- HANSEN, B. B., R. AANES, I. HERFINDAL, J. KOHLER et B. E. SAETHER (2011). "Climate, icing, and wild arctic reindeer: past relationship and future prospects", *Ecology*, 92: 1917-1923.
- HEDSTROM, N. R. et J. W. POMEROY (1998). "Accumulation of intercepted snow in the boreal forest: measurements and modelling", *Hydrological Processes*, 12: 1611-1623.
- HOTHORN, T., J. MÜLLER, L. HELD, L. MÖST et A. MYSTERUD (2015). "Temporal patterns of deer-vehicle collisions consistent with deer activity pattern and density increase but not general accident risk", *Accident Analysis and Prevention*, 81: 143-152.
- IPCC (2013). "Summary for policymakers", dans *Climate Change 2013: the Physical Science Basis* (Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner et coll. eds.), p. 3-29, Cambridge University press, Cambridge.
- JARVIS, P. et S. LINDER (2000). "Constraints to growth of boreal forests", *Nature*, 405: 904-905.
- JENOUVRIER, S. (2013). "Impacts of climate change on avian populations", *Global Change Biology*, 19: 2036-2057.
- JUDSON, A. et N. DOESKEN (2000). "Density of freshly fallen snow in the Central Rocky Mountains", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81: 1577-1587.
- KRASTING, J. P., A. J. BROCCOLI, K. W. DIXON et J. R. LANZANTE (2013). "Future changes in Northern Hemisphere snowfall", *Journal of Climate*, 26: 7813-7828.
- LA SORTE, F. A. et W. JETZ (2012). "Tracking of climatic niche boundaries under recent climate change" *Journal of Animal Ecology*, 81: 914-925.
- MASSE, A. et S. D. COTE (2013). "Spatiotemporal variations in resources affect activity and movement patterns of white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) at high density", *Canadian Journal of Zoology*, 91: 252-263.
- MELØYSUND, V., B. LEIRA, K. V. HØISETH et K. R. LISØ (2007). "Review: predicting snow density using meteorological data", *Meteorological Applications*, 14: 413-423.

- MORRISON, S. F., G. J. FORBES, S. J. YOUNG et S. LUSK (2003). "Within-yard habitat use by white-tailed deer at varying winter severity", *Forest Ecology and Management*, 172: 173-182.
- MOSS, R. H., J. A. EDMONDS, K. A. HIBBARD, M. R. MANNING, S. K. ROSE, D. P. VAN VUUREN, T. R. CARTER, S. EMORI, M. KAINUMA, T. KRAM, G. A. MEEHL, J. F. B. MITCHELL, N. NAKICENOVIC, F. RIAHI, S. J. SMITH, R. J. STOUFFER, A. M. THOMPSON, J. P. WEYANT et T. J. WILBANKS (2010). "The next generation of scenarios for climate change research and assessment", *Nature*, 463:7 47-756.
- OLSON, D. D., J. A. BISSONETTE, P. C. CRAMER, K. D. BUNNELL, D. C. COSTER et J. J. JACKSON (2015). "How does variation in winter weather affect deer—vehicle collision rates?", *Wildlife Biology*, 21: 80-87.
- OZOGA, J. J. et L. W. GYSEL (1972). "Response of white-tailed deer to winter weather", *Journal of Wildlife Management*, 36: 892-896.
- PARKER, K. L. et C. T. ROBBINS (1984). "Thermoregulation in mule deer and elk" *Canadian Journal of Zoology*, 62: 1409-1422.
- PIELMEIER, C. et M. SCHNEEBELI (2002). "Snow stratigraphy measured by snow hardness and compared to surface section images" *Proceedings of the International Snow Sciences Workshop*, 8 p.
- POMEROY, J. W. et E. BRUN (2001). "Physical properties of snow", dans *Snow Ecology: an Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems* (H. G. Jones, J. W. Pomeroy, D. A. Walker, R. W. Hoham eds.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 45-126.
- POTVIN, F. (1989). *Analyse du système de suivi du cerf au Québec*, ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 27 p.
- POTVIN, F. et L. BRETON (1986). *Sommaire des conditions d'enneigement pour le cerf au Québec de 1973 à 1985*, ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 62 p.
- POTVIN, F. et L. BRETON (1992). *Rigueur de l'hiver pour le cerf au Québec : description de l'indicateur prévisionnel NIVA et présentation d'un logiciel approprié*, ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 21 p.
- RENARD, A., M. LAVOIE et S. LARIVIERE (2008). "Differential footload of male and female fisher, *Martes pennant*, in Quebec", *Canadian Field-Naturalist*, 122: 269-270.
- RIAHI, K., S. RAO, V. KREY, C. CHO, V. CHIRKOV, G. FISCHER, G. KINDERMANN, N. NAKICENOVIC et P. RAFAJ (2011). "RCP 8.5-a scenario of comparatively high greenhouse gas emissions", *Climate Change*, 109: 33-57.

- SKOGLAND, T. (1978). "Characteristics of the snow cover and its relationship to wild mountain reindeer (*Randifer tarandus tarandus* L.) feeding strategies", *Arctic and Alpine Research*, 10: 569-579.
- THOMPSON, A. M., K. V. CALVIN, S. J. SMITH, G. P. KYLE, A. VOLKE, P. PATEL, S. DELGADO-ARIAS, B. BOND-LAMBERTY, M. A. WISE, L. E. CLARKE et J. A. EDMONDS (2011). "RCP 4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100", *Climatic Change*, 109: 77-94.
- TIERSON, W. C., G. F. MATTFELD, R. W. SAGE JR et D. F. BEHREND (1985). "Seasonal movements and home ranges of white-tailed deer in the Adirondacks", *Journal of Wildlife Management*, 49: 760-769.

Annexes

Annexe 1. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enfoncement maximal annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	A	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	5403,3	5403,5	0,0	0,9
Alt*(Lat+Long)	6	5412,9	5413,0	9,5	0,1
Alt+Long+Lat	4	5448,9	5449,0	45,4	0,0
Lat+Long	3	5456,7	5456,7	53,2	0,0
Lat*Long	4	5457,3	5457,4	53,8	0,0
Lat	2	5475,6	5475,6	72,1	0,0
Long	2	5605,4	5605,4	201,8	0,0
Alt ²	3	5712,0	5712,0	308,5	0,0
Alt	2	5731,4	5731,4	327,9	0,0
Intercept	1	5744,7	5744,7	341,2	0,0

Annexe 2. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enfoncement moyen annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude et la triple interaction (:) ont également été évalués. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt*(Lat+Long)	6	4549,3	4549,4	0,0	0,8
Alt ² *(Lat+Long)	9	4553,0	4553,3	3,9	0,2
Lat*Long	4	4588,7	4588,8	39,4	0,0
Alt+Long+Lat	4	4599,3	4599,4	50,0	0,0
Lat+Long	3	4608,1	4608,1	58,7	0,0
Lat	2	4658,2	4658,2	108,8	0,0
Long	2	4772,2	4772,2	222,8	0,0
Alt ²	3	4826,4	4826,4	277,0	0,0
Alt	2	4835,4	4835,4	286,0	0,0
Intercept	1	4840,1	4840,2	290,8	0,0

Annexe 3. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enfoncement cumulatif annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	10 526,9	10 527,1	0,0	1,0
Alt*(Lat+Long)	6	10 933,4	10 933,6	406,4	0,0
Alt+Long+Lat	4	12 223,1	12 223,2	1696,0	0,0
Lat*Long	4	12 370,5	12 370,6	1843,4	0,0
Lat+Long	3	12 547,9	12 547,9	2020,8	0,0
Lat	2	14 086,1	14 086,1	3558,9	0,0
Long	2	19 855,3	19 855,3	9328,1	0,0
Alt ²	3	24 515,0	24 515,0	13 987,9	0,0
Alt	2	26 301,4	26 301,4	15 774,3	0,0
Intercept	1	26 856,3	26 856,3	16 329,2	0,0

Annexe 4. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enneigement maximal annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+), L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ² *(Lat+Long)	9	5715,5	5715,8	0	1,0
Alt*(Lat+Long)	6	5736,8	5737,0	21,3	0,0
Lat*Long	4	5756,3	5756,3	40,6	0,0
Alt+Long+Lat	4	5758,6	5758,7	43	0,0
Lat+Long	3	5760,7	5760,8	45,1	0,0
Lat	2	5795,4	5795,4	79,7	0,0
Long	2	5966,1	5966,1	250,4	0,0
Alt ²	3	6096,1	6096,1	380,4	0,0
Alt	2	6115,1	6115,1	399,4	0,0
Intercept	1	6121,7	6121,7	406	0,0

Annexe 5 Modèle évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enneigement moyen annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	5094,2	5094,5	0	0,9
Alt*(Lat+Long)	6	5102,5	5102,6	8,2	0,1
Lat+Long	3	5142,7	5142,7	48,3	0,0
Alt+Long+Lat	4	5143,1	5143,1	48,7	0,0
Lat*Long	4	5144,5	5144,6	50,2	0,0
Lat	2	5197,9	5197,9	103,5	0,0
Long	2	5319,9	5319,9	225,5	0,0
Alt ²	3	5381,7	5381,7	287,3	0,0
Intercept	1	5391,3	5391,3	296,9	0,0
Alt	2	5392,0	5392,1	297,6	0,0

Annexe 6. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur l'enneigement cumulatif annuel ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	ΔAICc	Poids de l'AICc
Alt ² *(Lat+Long)	9	18 437,1	18 437,4	0	1,0
Alt*(Lat+Long)	6	19 762,8	19 762,9	1325,5	0,0
Lat*Long	4	21 230,1	21 230,2	2792,8	0,0
Alt+Long+Lat	4	21 294,8	21 294,8	2857,4	0,0
Lat+Long	3	21 393,8	21 393,9	2956,5	0,0
Lat	2	23 766,7	23 766,8	5329,4	0,0
Long	2	32 858,0	32 858,0	14 420,6	0,0
Alt ²	3	41 323,5	41 323,6	22 886,2	0,0
Alt	2	44 467,8	44 467,8	26 030,4	0,0
Intercept	1	44 824,8	44 824,8	26 387,4	0,0

Annexe 7. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre moyen de jours de plus de 50 cm d'enfoncement annuellement ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	1454,9	1455,2	0	0,8
Alt*(Lat+Long)	6	1460,8	1460,9	5,8	0,2
Alt+Long+Lat	4	1484,9	1484,9	29,8	0,0
Lat+Long	3	1487,1	1487,1	31,9	0,0
Lat*Long	4	1491,0	1491,0	35,9	0,0
Lat	2	1605,3	1605,4	150,2	0,0
Long	2	1749,6	1749,6	294,5	0,0
Alt ²	3	1762,4	1762,5	307,3	0,0
Intercept	1	1775,4	1775,4	320,3	0,0
Alt	2	1782,1	1782,1	327	0,0

Annexe 8. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre cumulatif de jours de plus de 50 cm d'enfoncement annuellement ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	9704,9	9705,1	0	1,0
Alt*(Lat+Long)	6	10 150,7	10 150,9	445,8	0,0
Alt+Long+Lat	4	10 498,2	10 498,2	793,2	0,0
Lat+Long	3	10 569,4	10 569,5	864,4	0,0
Lat*Long	4	10 574,5	10 574,6	869,5	0,0
Lat	2	11 982,4	11 982,4	2277,4	0,0
Long	2	14 641,4	14 641,4	4936,3	0,0
Alt ²	3	15 516,0	15 516,0	5811	0,0
Alt	2	16 387,0	16 387,0	6681,9	0,0
Intercept	1	16 425,9	16 425,9	6720,8	0,0

Annexe 9. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre moyen de jours de plus de 50 cm d'enneigement annuellement ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	Δ AICc	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	1911,7	1912,0	0,0	0,7
Alt*(Lat+Long)	6	1913,3	1913,5	1,5	0,3
Alt+Long+Lat	4	1925,6	1925,6	13,7	0,0
Lat+Long	3	1934,6	1934,6	22,6	0,0
Lat*Long	4	1942,6	1942,7	30,7	0,0
Lat	2	2015,0	2015,0	103,0	0,0
Alt ²	3	2151,7	2151,7	239,8	0,0
Long	2	2154,7	2154,7	242,7	0,0
Intercept	1	2174,9	2174,9	262,9	0,0
Alt	2	2186,0	2186,1	274,1	0,0

Annexe 10. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre cumulatif de jours de plus de 50 cm d'enneigement annuellement ($n = 662$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèles (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude et la triple interaction (:) ont également été évalués. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	9684,0	9684,2	0	1,0
Alt*(Lat+Long)	6	10 096,4	10 096,6	412,3	0,0
Alt+Long+Lat	4	10 311,4	10 311,5	627,2	0,0
Lat+Long	3	10 429,4	10 429,4	745,2	0,0
Lat*Long	4	10 520,9	10 521,0	836,7	0,0
Lat	2	11 665,3	11 665,3	1981	0,0
Long	2	14 176,4	14 176,4	4492,2	0,0
Alt ²	3	14 724,4	14 724,4	5040,1	0,0
Intercept	1	15 617,0	15 617,0	5932,8	0,0
Alt	2	15 654,8	15 654,9	5970,6	0,0

Annexe 11. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt) et des coordonnées géographiques (lat et long) sur le nombre de jours entre le premier et le dernier relevé (n = 662) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt ^{2*} (Lat+Long)	9	-672,6	-672,3	0	1,0
Alt+Long+Lat	4	-653,2	-653,1	19,2	0,0
Alt*(Lat+Long)	6	-650,9	-650,8	21,5	0,0
Lat	2	-552,5	-552,5	119,8	0,0
Lat+Long	3	-551,0	-550,9	121,3	0,0
Lat*Long	4	-549,1	-549,0	123,3	0,0
Long	2	-31,1	-31,1	641,2	0,0
Alt ²	3	1582,3	1582,3	2254,6	0,0
Alt	2	1776,6	1776,6	2448,9	0,0
Intercept	1	2221,9	2221,9	2894,2	0,0

Annexe 12. Modèles évaluant l'effet de l'altitude (alt), des coordonnées géographiques (lat et long), du mois (Mois) et du jour dans l'année (Jour_jul) sur l'enneigement à chacun des relevés ($n = 7132$) calculé à 30 stations de règles à neige gérées par le MFFP de 1975 à 2015. Certains modèles testent s'il existe des relations entre les variables du modèle (*) ou si elles agissent indépendamment les unes des autres (+). L'effet quadratique (exposant 2) de l'altitude a également été évalué. L'année a été intégrée en facteur aléatoire afin de considérer les mesures répétées.

Modèle	Nombre de paramètres	AIC	AICc	$\Delta AICc$	Poids de l'AICc
Alt*(Lat+Long)*Mois	12	66 002,11	66 002,16	0	1
Alt*Long*Mois	8	75 943,63	75 943,65	9941,495	0
Alt+Long+Mois	4	77 856,22	77 856,23	11 854,07	0
Alt ² *mois	6	82 420,72	82 420,74	16 418,58	0
Alt ² +mois	4	84 306,7	84 306,7	18 304,54	0
Mois	2	86 662,57	86 662,57	20 660,41	0
Jour_jul	2	103 187,6	103 187,6	37 185,4	0
Alt ² *(Lat+Long)	9	105 401,5	105 401,5	39 399,32	0

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 