



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

MODÉLISATION SPATIALE DE LA DÉGRADATION DES CHEMINS
FORESTIERS GRAVELÉS EN FORÊT BORÉALE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉCOLOGIE

PAR
PATRICIA GIRARDIN

NOVEMBRE 2020

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mes directeurs, Osvaldo Valeria et François Girard, qui m'ont offert de loin le projet le plus motivant que j'aurais pu espérer pour ma maîtrise. Merci pour votre soutien, vos encouragements et d'avoir fait de ce projet un travail d'équipe exceptionnel. Ce n'est que le commencement d'une belle collaboration !

Un merci spécial aux partenaires du projet que j'ai rencontré pendant ma période d'acquisition de données, c'est-à-dire Claude Laflamme de chez Rival Solutions ©, Francis Perreault, Denis Dubé, François Lévesque et Martin Germain de chez Produits Forestiers Résolu © et Denis Chiasson de chez Barrette-Chapais ©. Je tiens aussi à remercier particulièrement Philippe Marchand d'avoir répondu à toutes mes questions/doutes concernant mes analyses statistiques. Un grand merci à mon frère, Philippe, pour ton aide et ta motivation tout au long de nos trois sorties de terrain. Je n'aurais pas pu demander un meilleur assistant de terrain et chauffeur de pickup ! Merci aussi à Lievin Nkuba de nous avoir assistés lors de notre première sortie en Abitibi. Je tiens à remercier aussi toute ma famille de m'avoir encouragée tout au long de ce projet, ainsi que Jean-Philippe pour tes encouragements et ton écoute depuis le tout début !

Avant de terminer, il faut absolument que je souligne le support remarquable de Roxane Archambault-Vermet, Maude Perrault-Hébert et Vlad Saghin. Vos conseils et votre écoute ont été très précieux tout au long de ce projet.

Merci à tous et toutes !

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de maîtrise comprend trois chapitres. Le Chapitre I fait office d'introduction générale de l'étude, présentant une mise en contexte, l'état des connaissances, les objectifs et les hypothèses. Le Chapitre II présente l'ensemble de la recherche effectuée sous forme d'article scientifique, où s'y retrouvent la problématique, la méthodologie et les résultats, ainsi qu'une discussion approfondie des résultats, des retombés et des limites de l'étude. Ce mémoire se termine avec une conclusion générale au Chapitre III.

L'article du Chapitre II sera soumis à la revue libre d'accès « Remote sensing » avec comme auteurs Patricia Girardin, Osvaldo Valeria et François Girard. Je suis la principale responsable de l'étude, de la collecte des données, de leur analyse et de la rédaction du mémoire et de l'article. Mon directeur et mon codirecteur ont contribué à la conception de l'étude et m'ont assisté dans l'interprétation des résultats. Ils ont aussi révisé de manière critique et constructive le contenu du mémoire et de l'article.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	v
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xiii
RÉSUMÉ	xv
CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 État des connaissances	3
1.2.1 Caractéristiques morphologiques des chemins forestiers	3
1.2.2 Dégradation des chemins forestiers	4
1.2.3 Systèmes de classification des chemins forestiers	9
1.2.4 Méthodes de détection de la dégradation	10
1.2.5 Détection de la dégradation à l'aide de la télédétection.....	12
1.3 Objectifs et hypothèses.....	14
1.3.1 Objectifs spécifiques	14
1.3.2 Hypothèses	15
CHAPITRE II MODÉLISATION SPATIALE DE LA DÉGRADATION DES CHEMINS FORESTIERS GRAVELÉS EN FORÊT BORÉALE.....	17
2.1 Résumé	18
2.2 Introduction	20
2.3 Matériel et méthode.....	22
2.3.1 Localisation et caractéristiques des sites d'étude	22
2.3.2 Dispositif expérimental	23
2.3.3 Observation de la dégradation <i>in situ</i>	25
2.3.4 Détection de la dégradation à distance.....	29
2.3.5 Analyses statistiques	30
2.4 Résultats	33
2.4.1 Modèles de régression de la dégradation	33
2.4.2 Sélection des modèles candidats	35
2.4.3 Prédications et validation des modèles candidats	37
2.5 Discussion	42

2.5.1	Performance des modèles de prédiction de la dégradation	42
2.5.2	Variables retenues pour estimer la dégradation	43
2.5.3	Limites de l'étude.....	47
2.5.4	Implication future.....	49
2.6	Conclusion.....	50
CHAPITRE III CONCLUSION GÉNÉRALE		53
ANNEXE A		55
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE		57

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Caractéristiques morphologiques d'un chemin forestier (Desautels et al., 2009).....	3
1.2	Formes de dégradation communes aux chemins forestiers en période estivale. A : Ondulations ; B : Nids-de-poule ; C : Ornières ; D : Roulières ; E : Érosion (par l'eau) ; F : Végétation ; G : Émergence de la sous-fondation ; H : Bris partiel ; I : Bris complet.....	8
2.1	Localisation des trois secteurs d'étude dans la province de Québec à l'est du Canada. Aperçu des sites d'échantillonnage (points noirs) et du réseau des chemins forestiers étudiés (gris foncé) au sein des trois secteurs respectifs.....	23
2.2	Boîte à moustaches de la dégradation des chemins en fonction de la largeur du chemin et de la pente. La ligne épaisse représente la médiane (50e percentile). Le carré représente la distribution des données entre les 25e et 75e percentiles, c'est-à-dire que 50 % de données se situent dans cet intervalle. Les lignes prolongées représentent la variabilité en dehors des percentiles supérieur et inférieur. Les points sont des valeurs extrêmes.....	26
2.3	Formes de dégradation observées en ordre d'importance ; A : Ornières ; B : Érosion (par l'eau) ; C : roulières ; D : émergence de la sous-fondation ; E : nids-de-poule ; F : ondulations.....	27
2.4	Proportion (%) de l'échantillon (cumulatif de tous les tronçons échantillonnés) qui se manifeste sous forme d'ornière, d'érosion, de roulière, d'émergence de la sous-fondation, de nids-de-poule et d'ondulations en fonction des trois largeurs de chemin.....	28
2.5	Proportion (%) de l'échantillon (cumulatif de tous les tronçons échantillonnés) dégradé par les différentes formes de dégradation pour les chemins en pente >4 % (boîtes noires) et en pente ≤4 % (boîtes hachurées). Les chiffres à l'intérieur de barres représentent la valeur en pourcentage. Les ondulations ne sont pas présentées en raison de leur faible pourcentage d'observation.	28
2.6	Courbes de prédictions de la dégradation (%) simulées à partir des estimations du modèle de régression bêta retenu pour l'approche	

- Terrain en fonction de différentes valeurs de pente, de temps et de PPSR selon les trois largeurs de chemin. Les simulations (a) présentent le taux de dégradation prédit lorsque tous les prédictors, sauf celui retenu sur les graphiques respectifs, n'ont pas d'effet (c.-à-d. égaux à zéro). Les simulations (b) présentent le taux de dégradation prédit lorsque les valeurs des prédictors augmentent. 40
- 2.7 Courbes de prédictions de la dégradation (%) simulées à partir des estimations du modèle de régression bêta retenu pour l'approche Télédétection. Pour chacun des prédictors (moyenne NDVI, moyenne TRI, pourcentage de dépression du TPI), les courbes simulent leur effet individuel (lignes pleines) et combiné (avec les deux autres prédictors à valeur fixe ; lignes pointées). La valeur fixe utilisée pour les courbes combinés correspond à la moyenne des prédictors, soit moyenne TRI=0,22, moyenne NDVI=0,5 et pourcentage de dépression du TPI=50%. 41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Exemples de systèmes de classification des chemins forestiers au Canada (FMB, 2015 ; Gouvernement de l'Alberta, 2016 ; MFFP, s.d.).....	9
2.1	Caractéristiques des chemins forestiers gravelés étudiés au sein des trois secteurs d'étude et leurs données bioclimatiques (Blouin et al., 2008 ; Gosselin, 2002 ; Leboeuf, 2016).	22
2.2	Descriptions des indices spatiaux utilisés pour estimer la dégradation des chemins forestiers à distance.	30
2.3	Coefficients de corrélation (R) entre la dégradation et les indices extraits du LiDAR ou Sentinel 2 (c.-à-d. NDVI) et les variables Terrain. Les métriques utilisées sont l'écart-type, la valeur minimale, maximale, moyenne et le pourcentage de dépression et de végétation. Les astérisques représentent la statistique significative (* p -value $\leq 0,05$, ** p -value $\leq 0,01$ et *** p -value $\leq 0,001$) du coefficient de corrélation. En présence d'un point ou en l'absence d'astérisque, le coefficient de corrélation n'est pas significatif ($p > 0,05$).....	34
2.4	Présentation des modèles candidats de l'approche Terrain et Télédétection en fonction de l'AICc, du delta (Δ) et du poids (w_i) d'AICc. Les encadrés gris présentent les variables retenues dans les modèles candidats.	36
2.5	Coefficients et ordonnées à l'origine (différents selon les trois catégories de largeur de chemin) estimés et p -value des prédicteurs des modèles de la régression bêta retenus pour les approches Terrain et Télédétection.	37
2.6	Validation des modèles de prédictions retenus pour les approches Terrain et Télédétection.	38

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AICc	Critère d'information d'Akaike corrigé pour les petits échantillons
CSI	<i>Curvature surface index</i> – Indice de courbure de surface
CSII	Indice de courbure de surface longitudinal
CSIs	Indice de courbure de surface standard
CSIt	Indice de courbure de surface transversal
LiDAR	<i>Light detecting and ranging</i> – Télédétection par laser
MHC	Modèle de hauteur de canopée
MNT	Modèle numérique de terrain
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> – Indice de végétation par différence normalisée
PIR	Proche infrarouge
PPSR	Pourcentage de perte de surface de roulement
TPI	<i>Topographic positioning index</i> —Indice de position topographique
TRI	<i>Terrain ruggedness index</i> — Indice de rugosité de terrain
TWI	<i>Topographic wetness index</i> — Indice d'humidité topographique

RÉSUMÉ

Au Canada, les chemins forestiers représentent un vecteur d'accessibilité à la forêt boréale aménagée qui offre de nombreuses retombées économiques (p. ex. récolte du bois), environnementales (p. ex. suivis des perturbations) et sociales (accès secteur de villégiature). Toutefois, leur construction et leur utilisation ne sont pas sans répercussions (p. ex. coût élevé de construction et d'entretien, fragmentation des habitats, conflit entre les usagers). Ces effets sont d'ailleurs plus notables lorsque les chemins ne sont pas entretenus. En effet, la dégradation des chemins forestiers entraîne de forts impacts négatifs sur l'accès au territoire forestier, tout comme des répercussions économiques (p. ex. augmentation des coûts d'entretien), environnementales (p. ex. érosion des matériaux et donc contamination des habitats) et sociales (p. ex. perte d'accès pour les usagers et sécurité de déplacement compromise). De ce fait, pour maintenir un accès durable et sécuritaire au territoire forestier, il faut avant tout avoir une bonne compréhension et connaissance de la dégradation des chemins forestiers dans le temps et l'espace.

Cette étude vise à fournir une meilleure compréhension et de nouvelles connaissances spatio-temporelles de l'état du réseau des chemins forestiers canadiens en 1) construisant un modèle prédictif de la dégradation des chemins forestiers gravelés et en évaluant l'impact de la pente, du temps, de la perte de surface de roulement et de la largeur du chemin sur la présence de dégradation (approche Terrain) et 2) évaluant le potentiel des indices de topographie, de rugosité et de végétation obtenus des données du LiDAR aéroporté et des images optiques Sentinel 2 pour estimer le taux de dégradation (approche Télédétection).

Pour l'approche Terrain, le modèle de régression bêta retenu pour prédire la dégradation (pseudo- R^2 0,43, SMSE ± 8 %) confirme que la pente, la perte de surface de roulement (PPSR), le temps et la largeur du chemin sont des indicateurs essentiels. Selon les simulations effectuées, moins de 5 % de dégradation s'installe sur un chemin forestier dans les cinq premières années sans entretien, peu importe sa largeur. Lorsque ce seuil est franchi, la dégradation augmente exponentiellement et s'intensifie plus la pente et la perte de surface de roulement sont élevées et que le chemin est étroit.

L'approche Télédétection confirme que pour détecter la dégradation des chemins forestiers à distance, l'utilisation d'un indice de topographie, de rugosité et de végétation extraits du LiDAR et de Sentinel 2 offre une solution prometteuse. Plus précisément, le modèle de prédiction résultant (pseudo- R^2 0,34 et SMSE ± 9 %) a retenu la synergie entre l'indice de position topographique (TPI), l'indice de rugosité de terrain (TRI) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Selon les simulations, un taux plus élevé de dégradation a été détecté lorsque la surface de

roulement présente un fort pourcentage de dépressions, est peu homogène (TRI) et recense une forte présence de végétation (NDVI).

Cette étude a permis de fournir de nouvelles connaissances et une meilleure compréhension de la dégradation du réseau routier en milieu forestier. En effet, nous avons dorénavant une meilleure compréhension temporelle de la dégradation grâce à l'approche Terrain et une connaissance spatiale de l'état actuel des chemins grâce à l'approche Télédétection. Les informations obtenues des deux modèles de prédictions développés sont grandement utiles pour le maintien et la durabilité de l'accès au territoire forestier boréal canadien à court et à long terme.

Mots clés : aménagement, accès, indices spatiaux, LiDAR aéroporté, rugosité, Sentinel 2, topographie.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte

Au Canada, plus d'un million de kilomètres de chemins s'étendent sur la majorité du territoire forestier aménagé. Avec l'étalement constant du réseau au fil des décennies, les chemins forestiers sont devenus des vecteurs d'accessibilité à des fins économiques, mais aussi environnementales et sociales. Ils permettent avant tout d'accéder aux forêts qui possèdent une valeur commerciale estimée à plus de 200 milliards de dollars (Statistique Canada, 2018). À lui seul, le secteur forestier canadien génère plus d'un milliard de dollars de revenus par année (CCFM, 2020), dont 20 à 25 millions de dollars contribuent au PIB du pays (Statistique Canada, 2020). Les chemins forestiers offrent aussi un accès à d'autres secteurs économiques lucratifs comme l'industrie minière, l'hydro-électricité et l'agriculture (Forest Practices Board, 2015). Puis, ils jouent un rôle déterminant au niveau des suivis environnementaux et de l'aménagement durable de la forêt. Grâce à l'accès qu'ils fournissent, les gouvernements et les scientifiques peuvent effectuer des suivis des épidémies d'insectes, des feux de forêt, des chablis et de la récolte forestière. Une bonne compréhension de ces perturbations est essentielle à une gestion durable des territoires forestiers. De plus, bien qu'*a priori* la construction du réseau fût motivée par l'industrie forestière (Bourgeois et al., 2005), les chemins sont devenus des liens cruciaux pour les communautés rurales et offrent de nombreuses opportunités récréatives. Il est fréquent que des villégiateurs, chasseurs et pêcheurs profitent du réseau routier forestier mis en place pour y pratiquer leurs activités.

De ce point de vue, nous notons que les bénéfices des chemins forestiers sont multiples. Toutefois, la densification du réseau au fil du temps engendre de nombreux impacts. Comme Bourgeois et al. (2005) l'ont mentionné, « les routes sont souvent la première perturbation humaine à l'intérieur de la forêt ». Entre 1990 et 2015, 6 % de la forêt canadienne a été convertie en chemins forestiers (Statistique Canada, 2018). Lorsqu'un chemin est construit, il engendre des impacts sur son environnement, notamment en engendrant une compaction du sol, en fragmentant le territoire, en augmentant le taux d'érosion et de lessivage des sédiments dans les cours d'eau et en introduisant des espèces invasives (Bourgeois *et al.*, 2005 ; Caliskan, 2013 ; Fahrig et Rytwinski, 2009 ; Forest Practices Board, 2015 ; Gucinski *et al.*, 2001 ; Luce et Wemple, 2001). De plus, l'implantation d'un réseau routier nécessite des investissements importants autant lors de sa construction, de son entretien et de sa déconstruction (lorsque pratiquée). Par exemple, en Colombie-Britannique, le coût annuel de construction de chemins en milieu forestier s'élève à 90 millions de dollars et à 80 millions de dollars pour l'entretien et la déconstruction (Forest Practices Board, 2015), alors qu'au Québec, la construction d'un chemin peut coûter jusqu'à 350 000 \$ pour chaque kilomètre (Desautels et al., 2009). Puis, d'un point de vue social, l'accès au territoire public peut créer des conflits entre les différents usagers (Gucinski et al., 2001) et les communautés autochtones présentes sur le territoire (Bourgeois et al., 2005).

Une fois la construction achevée, les chemins doivent être entretenus régulièrement afin de les maintenir carrossables (Kiss et al., 2015). Dans le cas contraire, le chemin commencera à se dégrader. La présence de dégradation sur un chemin forestier engendrera de nombreux risques, dont une perte d'accès au territoire forestier, un danger pour tous les utilisateurs, une augmentation des coûts d'entretien et plusieurs enjeux environnementaux (p. ex. contamination des habitats avoisinants par l'érosion de la surface de roulement) (Gucinski et al., 2001). Cela aura pour effet d'entraîner des répercussions sur les bénéfices qu'ils offrent et une accentuation considérable de leurs impacts économiques, environnementaux et sociaux. De ce fait, le maintien d'un accès

sécuritaire et durable au territoire forestier nécessite une bonne compréhension de sa dégradation dans le temps et l'espace.

1.2 État des connaissances

1.2.1 Caractéristiques morphologiques des chemins forestiers

Bien que chaque chemin forestier soit unique, leurs caractéristiques morphologiques restent similaires. Le profil transversal de la Figure 1.1 présente les caractéristiques communes des chemins forestiers.

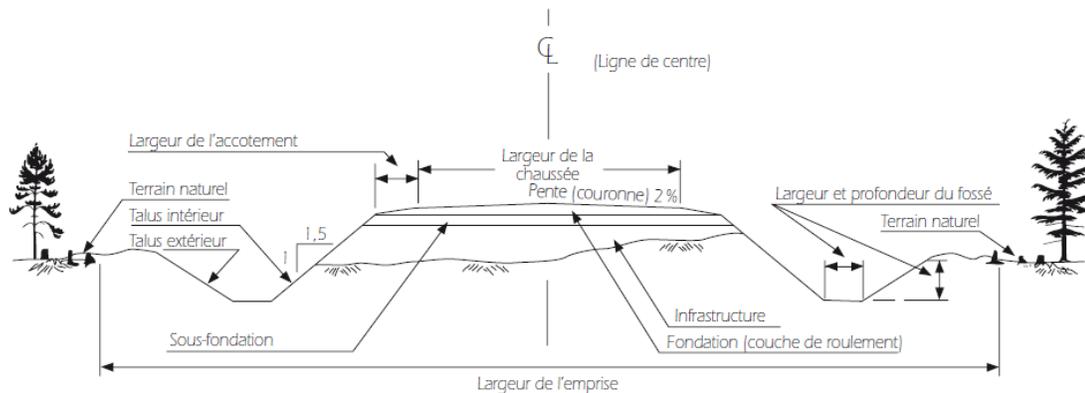


Figure 1.1 Caractéristiques morphologiques d'un chemin forestier (Desautels et al., 2009).

Un chemin forestier comprend deux structures majeures, soit 1) la sous-fondation, qui représente la couche structurelle du chemin et 2) la couche de roulement (fondation) correspondant à l'emplacement où circulent les véhicules, qui sont généralement composées de sable grossier ou de gravier concassé (Kaakkurivaara et al., 2015). Le terrain déboisé et utilisé pour la construction du chemin délimite l'emprise (Desautels et al., 2009). Un chemin, qu'il soit asphalté ou gravelé, n'est pas une surface totalement plane, mais plutôt une surface légèrement convexe à partir de son centre (couronne). Cette particularité est un élément très important dû à l'accumulation d'eau dans la

structure du chemin (Desautels et al., 2009). De part et d'autre de la surface de roulement se trouve l'accotement, suivi d'un fossé. Le rôle de ces fossés latéraux est indispensable, puisqu'ils servent à évacuer les eaux de ruissellement à l'extérieur de l'emprise (Desautels et al., 2009). L'angle du talus, soit les parois du fossé, doit respecter certains standards (ratio hauteur : largeur correspondant à 1 : 1,5) afin d'assurer à la fois la stabilité du fossé et l'écoulement des eaux (Desautels et al., 2009).

1.2.2 Dégradation des chemins forestiers

La dégradation sur un chemin forestier se manifeste par la déformation de la structure causée par des stress environnementaux, structurels ou temporels. Ces processus entraînent différentes formes de dégradation qui peuvent rapidement devenir une source de danger ou d'inconforts pour les utilisateurs (Adlinge et Gupta, 2013).

1.2.2.1. Causes de la dégradation

- Taux de compaction : se définit par le nombre de passages de camion d'une charge donnée que peut supporter le chemin sans subir de déformation (O'mahony et al., 2000). Un taux de compaction élevé permettrait de prévenir de façon significative la dégradation sous toutes ses formes (Adlinge et Gupta, 2013 ; Akgul *et al.*, 2019 ; Kiss *et al.*, 2015).
- Entretien : vise à maintenir l'état initial du chemin lors de sa construction, par l'entremise notamment du nivelage, d'ajout de matériel à la surface de roulement, d'un nettoyage ou d'un creusage des fossés et d'un débroussaillage de l'emprise (MFFP, s.d.). Pour maintenir cette structure, il est suggéré de réaliser un entretien régulier pour les chemins les plus fréquentés et un entretien annuel (au minimum) pour les chemins les moins fréquentés (Ciobanu et al., 2012 ; Desautels et al., 2009 ; Jetté et al., 1998 ; Ryan et al., 2004).

- Type de matériau : le type de matériau utilisé pour confectionner la surface de roulement influence les formes et la dimension des dommages occasionnés aux chemins (Ciobanu et al., 2012). Pour la construction de chemins gravelés, il est conseillé d'avoir différentes tailles de particules, comme des cailloux (solidité), du sable (stabilité) et des argiles et limons (cohésion) (De Witt et al., 2020 ; Fannin et Lorbach, 2007 ; Latrémouille, 2012).
- Transport : la dégradation des chemins forestiers peut être causée par le mouvement des véhicules sur la surface de roulement, puisque le contact des pneus sur la chaussée fait bouger les particules en place (Ciobanu et al., 2012). Ainsi, un flux de transport important, des charges lourdes et une vitesse de déplacement élevée des véhicules génèrent une dégradation de la surface de roulement (Adlinge et Gupta, 2013 ; Ciobanu et al., 2012 ; Guo et al., 2015).
- Drainage et humidité : un chemin peut être mal drainé et donc accumuler une certaine quantité d'eau et d'humidité à sa surface et dans sa sous-fondation (Latrémouille, 2012). Le fait d'augmenter le taux d'humidité du chemin vient alors compromettre sa stabilité (Dobiaš, 2005 ; Ryan et al., 2004).
- Pente longitudinale : en milieu forestier, la pente longitudinale présente un fort risque d'érosion si la structure du chemin n'est pas conforme (p. ex. les eaux de précipitation ne ruissellent pas vers l'extérieur ou présence d'une mauvaise compaction). Dans de tels cas, lorsqu'une pente est inférieure à environ 4 %, la chaussée tend à avoir des formes de dégradation étroitement liées à l'accumulation des eaux (nids-de-poule, roulière et ornières) (Fannin et Lorbach, 2007 ; Ryan et al., 2004). Lorsque la pente augmente au-delà de 4 %, la dégradation est plutôt provoquée par le ruissellement des eaux et l'accélération des véhicules (Dittmer et Johnson, 1975 ; Dobiaš, 2005 ; Jetté et al., 1998).

Il existe une multitude de combinaisons de ces stress qui, en synergie, accentuent la dégradation. La pente influencera l'accélération des véhicules et donc entrainera une plus grande proportion de particules mises en mouvement. Combinés à un apport d'eau

important, un matériel facilement transportable, un faible entretien et une compaction inadaptée aux chemins, les dommages engendrés seront davantage notables. De ce fait, peu importe la ou les causes de dégradation des chemins forestiers, la vitesse de cette dernière dépendrait avant tout de l'amplitude, l'intensité et la durée des stress appliqués à la surface de roulement (Ciobanu et al., 2012).

1.2.2.2. Formes de dégradation

- Ondulations : aussi communément appelées « planche à laver », les ondulations sont des petites vagues formées à intervalle régulier et perpendiculaires au chemin (Latrémouille, 2012). Elles sont issues d'une distribution inégale des particules de la surface de roulement et d'un manque de compaction (Ciobanu et al., 2012) qui causent une perte d'adhérence des pneus. Les ondulations sont amplifiées par le passage répété de véhicules.
- Nids-de-poule : trous qui se manifestent sporadiquement à la surface du chemin. Ils sont formés par une dislocation des particules causée par une mauvaise compaction, un profil de chemin inadéquat (mauvais drainage) ou par l'action du trafic (Adlinge et Gupta, 2013 ; Ciobanu et al., 2012 ; Ryan et al., 2004).
- Ornières et roulières : dépressions linéaires parallèles au chemin causées par les roues des véhicules à la suite d'une diminution de la capacité de support de la surface de roulement ou de la sous-fondation (Adlinge et Gupta, 2013 ; Ciobanu et al., 2012). Ces formes de dégradation se différencient en fonction de leur largeur. Les roulières sont plus étroites, de la largeur des roues et témoignent d'une défaillance au niveau de la surface de roulement (Adlinge et Gupta, 2013). Les ornières sont quant à elles plus larges, formées avec le passage successif de plusieurs véhicules et résultent d'une défaillance de la sous-fondation du chemin (Adlinge et Gupta, 2013).

- Érosion : se traduit par le détachement et le transport des particules de la surface de roulement pouvant créer des chenaux d'écoulement de différentes ampleurs.
- Végétation : une forte présence de végétation sur les chemins forestiers signifie que le flux de transport est très faible et donc le chemin est probablement abandonné (Ryan et al., 2004). D'un autre côté, une absence de végétation témoigne d'un chemin souvent fréquenté et entretenu. La hauteur de la végétation est une information supplémentaire sur l'état du chemin. La présence d'arbres en bordure ou sur la surface de roulement signifie une absence de transport et/ou d'entretien.
- Émergence de la sous-fondation : la perte de matériau au niveau de la surface de roulement provoque l'émergence de la sous-fondation du chemin. Cette dernière se manifeste par la présence de roches surélevées de façon sporadique qui nuisent au confort au roulement du véhicule.
- Bris d'infrastructure : se manifeste soit par une destruction partielle ou complète de la surface de roulement, de la sous-fondation du chemin ou d'un pont ou ponceau (Balijepalli et Oppong, 2014). Les bris majeurs ont des conséquences sur l'accès au territoire (Paradis-Lacombe, 2018), pouvant isoler une région complète.



Figure 1.2 Formes de dégradation communes aux chemins forestiers en période estivale. A : Ondulations ; B : Nids-de-poule ; C : Ornières ; D : Roulières ; E : Érosion (par l'eau) ; F : Végétation ; G : Émergence de la sous-fondation ; H : Bris partiel ; I : Bris complet.

1.2.3 Systèmes de classification des chemins forestiers

Tableau 1.1 Exemples de systèmes de classification des chemins forestiers au Canada (FMB, 2015 ; Gouvernement de l'Alberta, 2016 ; MFFP, s.d.).

Classe	Largeur de la chaussée (m)	Largeur de l'emprise (m)	Durée d'utilisation (ans)	Limite de vitesse (km/h)
Québec				
1	≥ 8,5	35	25	70
2	8 – < 8,5	30	25	60
3	7,5 – < 8	30	10 – 15	50
4	5,5 – < 7,5	25	3 – 10	40
5	4 – < 5,5	20	1 – 3	20
Yukon				
1	≥10	===	> 10	60
2	≥8 – 10	===	< 10	40
3	≥6 – 8	===	1 – 3	30
4	≥4 – 6	===	1 – 3	30
Alberta				
1	30 – 40	8 – 12	> 20	===
2	20 – 30	5 – 10	5 – >20	===
3	7 – 20	5 – 10	20	===
4	7 – 20	5 – 10	3	===

Note : Les === indiquent une absence d'information.

Les chemins forestiers sont construits dans l'optique d'offrir un accès au territoire d'approvisionnement en matières ligneuses et de faciliter les déplacements principalement vers les usines de sciage et de transformation (Dallaire, 2013 ; Desautels et al., 2009). Au Canada, chaque province et territoire possède sa propre classification en se basant sur la largeur de la chaussée, la largeur de l'emprise, la saison d'utilisation, leur durée de vie ou leur fonction. Toutefois, ces classifications sont difficilement comparables entre elles, comme en témoigne le Tableau 1.1. Jusqu'à maintenant, il n'existe aucune classification nationale du réseau au Canada et cette

problématique n'est d'ailleurs pas récente. En 1975, Paterson et al. ont souligné l'absence d'un tel système de classification national. En sollicitant plus de 40 compagnies et opérateurs forestiers canadiens, les auteurs ont découvert qu'aucune d'entre elles ne possédait la même classification. Paterson et al. (1975) ont d'ailleurs été mandaté pour proposer un système de classification pour le pays. Bien que leur système ait été accepté par *Logging Operations Group of the Canadian Pulp and Paper Association*, il est laborieux de trouver des informations à ce qui a trait à son utilisation depuis sa création. Dans certains cas, comme au Québec et au Manitoba, les compagnies forestières utilisaient leur propre classification bien avant que le système provincial ait été mis en place. Ainsi, encore à ce jour, l'information est décentralisée et difficilement accessible.

1.2.4 Méthodes de détection de la dégradation

Pour déterminer l'état de la surface de roulement d'un chemin, qu'il soit en milieu urbain ou forestier, une base de données mise à jour continuellement sur les conditions du réseau est nécessaire (Kiss et al., 2015). De nombreuses méthodes existent, tel l'observation *in situ* de l'état de la surface de roulement en utilisant l'indice de l'état de la chaussée (*Pavement condition index* [PCI]) (Karim et al., 2016 ; Loprencipe et Pantuso, 2017 ; Setyawan et al., 2015) qui se base sur le type, la sévérité et la quantité des défauts observés (Shahin et Walther, 1990). Une autre approche est l'utilisation d'un indice de rugosité pour caractériser la qualité de la surface de roulement (Abulizi et al., 2016 ; Forslöf et Jones, 2015 ; Múčka, 2016 ; Prasad et al., 2013 ; Sayers, 1995). Cette technique utilise un capteur monté sur un véhicule qui enregistre les variations ressenties lorsque ce dernier est en mouvement (Paterson, 1986). L'indice le plus fréquemment utilisé est l'indice de rugosité international (IRI), un algorithme mathématique développé par la Banque mondiale en 1986 (Múčka, 2017 ; Sayers, 1995). Paterson (1986) présente toutefois d'autres alternatives à l'IRI, dont des mesures

de rugosité et des indices de confort au roulement. De leur côté, les études récentes d'Akgul et al. (2017) et de Ferenčík et al. (2019) ont démontré le potentiel d'utiliser un véhicule muni d'un laser mobile (*Mobile laser scanning*) pour capturer et mesurer l'état de la surface de roulement. Ensuite, certaines études se sont plutôt attardées à la capacité portante de la surface de roulement, un paramètre qui nous informe de la rigidité du chemin (Kaakkurivaara et al., 2015), c'est-à-dire le nombre de passages de camions d'une charge donnée que peut supporter le chemin sans se dégrader (O'mahony et al., 2000). Ce paramètre se calcule à l'aide de différents outils, dont un pénétromètre (Akgul *et al.*, 2019 ; Kaakkurivaara *et al.*, 2015), un radar à pénétration de sol (GPR) (Bianchini Ciampoli et al., 2019 ; Salvi et al., 2019) ou encore un déflectomètre (Kaakkurivaara et al., 2015 ; McFarlane et al., 1975 ; Thompson, 1975).

Mise à part l'étude de Kaakkurivaara et al. (2015) et Akgul et al. (2017), tous les exemples mentionnés ci-haut sont appliqués en milieu urbain, sur des chemins asphaltés. En fait, très peu d'études se sont attardées à l'utilisation de ces méthodes pour caractériser la dégradation des chemins forestiers gravelés. De plus, toutes ces approches nécessitent un inventaire répété sur le terrain, ce qui représente des coûts élevés en termes de temps, d'argent et de ressources requises (Zhang, 2008).

Avec l'avènement grandissant des outils de télédétection, des études se sont questionnées sur la faisabilité de détecter la dégradation du réseau routier à distance pour réduire notamment les coûts rattachés. De façon générale, la photogrammétrie est utilisée pour effectuer des mesures 3D des objets et des caractéristiques du terrain à partir d'images 2D (Aber et al., 2019) avec une précision à l'échelle centimétrique. Zhang (2008) et Pierzchała et al. (2016) ont d'ailleurs eu recours à cette technologie pour détecter efficacement les conditions de la surface des chemins forestiers, justifiant qu'une haute résolution spatiale des images obtenues est essentielle pour détecter et mesurer les caractéristiques des chemins. Cependant, les études de Kiss et al. (2015 et 2016) ont, pour leur part, utilisé le LiDAR aéroporté (*Light detecting and ranging*) pour

détecter la dégradation, car ils jugent que cette méthode est plus avantageuse que la photogrammétrie. En outre, cette approche permet de cartographier le terrain, les vastes structures (p. ex. végétation) et les éléments longs et étroits comme les lignes électriques et les routes (Kiss et al., 2015).

Outre que ces méthodes, l'utilisation d'images multispectrales peut aussi être prometteur, bien que celles-ci soient plutôt utilisées pour caractériser la dégradation des chemins en milieu urbain (Herold et al., 2004) ou pour cartographier le réseau routier urbain et forestier (Karila et al., 2017). Parmi les nombreux outils disponibles pour détecter la dégradation des chemins forestiers, le LiDAR aéroporté et les images multispectrales semblent les plus prometteurs, car ils offrent la possibilité de couvrir de vastes zones (Hyypä et al., 2000) sans avoir à se déplacer sur l'entièreté du réseau des chemins forestiers.

1.2.5 Détection de la dégradation à l'aide de la télédétection

Selon Kiss et al. (2015), la variation de la topographie et les fluctuations de la surface de roulement sont des indicateurs prometteurs pour détecter la dégradation sur un chemin. Ces auteurs ont utilisé le LiDAR aéroporté pour calculer l'indice de position topographique (TPI) (développé par Weiss, 2001) et l'indice d'élévation standardisé (SEI) afin de classifier la qualité (c.-à-d. bonne, satisfaisante et pauvre) des chemins forestiers en Finlande. Leurs résultats démontrent que la classification de la qualité des chemins à l'aide de ces outils est juste dans 66 % des cas.

De ce fait, en explorant davantage dans cette direction, nous avons noté d'autres indices qui pourraient obtenir des résultats aussi performants. Selon Ryan et al. (2004), un chemin saturé en eau est généralement deux fois moins solide qu'un chemin sec. Une instabilité du chemin peut engendrer des nids-de-poule, des roulières et ornières prononcées jusqu'à la destruction d'un tronçon complet (Latrémouille, 2012). Dobiaš

(2005) a étudié l'érosion de la chaussée par l'accumulation des eaux dans les formes de dégradation déjà existantes. Cette étude a démontré que plus la pente et l'apport en eau augmentent, plus le stress que subit la chaussée augmente. Ainsi, ces processus pourraient potentiellement être détectés à l'aide d'un second indice de topographie, soit l'indice d'humidité topographique (TWI) (Beven et Kirkby, 1979), puisque cet indice a justement pour but de quantifier l'effet de la topographie sur les processus d'accumulation des eaux à un endroit donné (Sørensen et al., 2006). Son utilisation permettrait de déterminer si la présence de zones humides sur la surface de roulement d'un chemin forestier serait corrélée avec leur dégradation.

Autre que le SEI, la fluctuation de la surface de roulement peut aussi être détectée par des indices de rugosité, puisqu'ils indiquent si le chemin possède une surface homogène ou hétérogène. Les indices de rugosité (p. ex. IRI) sont depuis longtemps utilisés en milieu urbain pour compiler la qualité et le confort au roulement à l'aide de véhicule en mouvement muni d'un capteur enregistrant les variations de la chaussée (Paterson, 1986). Puisque ces outils sont difficilement applicables en milieu forestier (Herold et al., 2004 ; Zhang, 2008), il est possible d'extraire des indices de rugosité à l'aide des données LiDAR, comme l'indice de rugosité de terrain (TRI) développé par Riley, DeGloria et Elliot (1999) et l'indice de courbure de la surface (outils disponibles dans un système d'information géographique). Une forte fluctuation de la dégradation peut être synonyme de forte rugosité et de forte présence de courbures au sein de la surface de roulement.

En milieu forestier, il est fréquent que la végétation commence à s'implanter sur un chemin lorsque son entretien est minime. À ce jour, très peu d'ouvrages ont abordé le rôle de cette variable sur la possibilité d'affecter la dégradation de la surface de roulement d'un chemin forestier. Ryan et al. (2004) signalent qu'un dégagement insuffisant de la végétation en bordure de chemin forestier entraîne un mauvais drainage et, par le fait même, nécessite plus d'entretien pour éviter qu'il se dégrade.

Heidari et al. (2018) ont pour leur part démontré que le pourcentage de canopée recouvrant un chemin forestier figurait sur la liste des variables significatives (p -value $< 0,05$) qu'ils ont retenues pour prédire la dégradation des chemins forestiers en Iran. Autrement, cette thématique a aussi été abordée en milieu urbain. Uchida et al. (2014) mentionnent que la végétation s'installant dans les fissures ou en bordure de la route « provoque la détérioration de l'asphalte et des bordures, réduisant la longévité et la sécurité de la surface de la route ». Ainsi, l'intégration de la végétation dans l'étude de la dégradation d'un chemin forestier semble un élément pertinent. Pour ce faire, des indices de végétation générés à partir d'images multispectrales (p. ex. indice de végétation par différence normalisée [NDVI]) ou du LiDAR aéroporté (c.-à-d. modèle de hauteur de canopée) peuvent être utilisés pour indiquer les caractéristiques de la végétation à un endroit donné.

1.3 Objectifs et hypothèses

Cette recherche vise à établir une base de connaissances sur l'état des chemins forestiers afin d'identifier les variables les plus importantes pour permettre une meilleure compréhension et un suivi plus adapté de leur dégradation.

1.3.1 Objectifs spécifiques

- 1) Construire un modèle prédictif de la dégradation des chemins forestiers gravelés et évaluer l'impact de la pente, du temps, de la perte de surface de roulement et de la largeur du chemin sur la présence de dégradation.
- 2) Évaluer le potentiel des indices de topographie, de rugosité et de végétation extraits des outils de télédétection (LiDAR aéroporté et Sentinel 2) pour estimer spatialement la dégradation du réseau routier forestier gravelé.

1.3.2 Hypothèses

- 1) a) Au fil du temps, les chemins les plus larges seraient moins dégradés que les chemins étroits, puisque leur structure est adaptée à un flux de transport élevé et à une utilisation sur le long terme.
b) Une pente $>4\%$ en milieu forestier augmenterait le taux de dégradation du chemin, peu importe sa largeur.
c) La perte de surface de roulement témoigne d'un entretien peu fréquent et donc d'une plus forte dégradation.

- 2) Les indices dérivés des MNT sont proportionnellement corrélés à la superficie de la surface de roulement occupée par les formes de dégradation les plus communes.
 - a) La dégradation se manifeste sous forme de dépressions (différentes topographies) qui seraient détectables avec les indices de topographie.
 - b) Une surface de roulement dégradée n'est pas homogène (présence de rugosité) et serait détectable avec un indice de rugosité de terrain.
 - c) La couverture végétale présente sur la surface de roulement témoigne d'un manque d'entretien qui serait observable à l'aide d'indices de végétation.

CHAPITRE II

MODÉLISATION SPATIALE DE LA DÉGRADATION DES CHEMINS FORESTIERS GRAVELÉS EN FORÊT BORÉALE

Patricia GIRARDIN¹, Osvaldo VALERIA¹ et François GIRARD²

¹ Institut de recherche sur les forêts, Université du Québec en Abitibi-
Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, QC J9X 5E4

² Département de Géographie, Université de Montréal, Campus MIL, 1375 Avenue
Thérèse-Lavoie-Roux, Montréal, QC H2V 0B3

2.1 Résumé

La dégradation des chemins forestiers au Canada entraîne de forts impacts négatifs sur l'accès au territoire forestier, tout comme des répercussions économiques (p. ex. augmentation des coûts d'entretien), environnementales (p. ex. érosion des matériaux et donc contamination des habitats) et sociales (p. ex. risque d'utilisation). Pour maintenir un accès durable et sécuritaire au territoire forestier, il faut avant tout avoir une bonne compréhension et connaissance de la dégradation des chemins forestiers dans le temps et l'espace. Cette étude vise donc à fournir une meilleure compréhension et de nouvelles connaissances spatio-temporelles de l'état du réseau des chemins forestiers canadiens en 1) construisant un modèle prédictif de la dégradation des chemins forestiers gravelés et en évaluant l'impact de la pente, du temps, de la perte de surface de roulement et de la largeur du chemin sur la présence de dégradation (approche Terrain) et 2) évaluant le potentiel des indices de topographie, de rugosité et de végétation obtenus des données du LiDAR aéroporté et des images optiques Sentinel 2 pour estimer le taux de dégradation (approche Télédétection). Pour ce faire, un dispositif expérimental de 207 placettes d'échantillonnage réparti sur le territoire forestier aménagé de l'est du Canada a été effectué pour quantifier le pourcentage réel de dégradation observée sur les chemins forestiers.

L'approche Terrain a confirmé que l'intégration du temps, de la pente, de la largeur du chemin et de la perte de surface de roulement comme prédicteur dans le modèle de prédiction (pseudo- R^2 0,43) sont nécessaires et permettent d'estimer à ± 8 % d'erreur le taux de dégradation sur un chemin. Les simulations effectuées démontrent qu'après environ 5 ans sans entretien, le taux de dégradation sur un chemin, peu importe sa largeur, augmente exponentiellement, le tout exacerbé par une pente et une perte de surface de roulement élevées. Puis, les chemins les plus étroits tendent à se dégrader plus rapidement au fil du temps.

L'approche Télédétection (pseudo- R^2 0,34) a confirmé que l'utilisation d'indice de topographie, de rugosité et de végétation à partir du LiDAR aéroporté et des images optiques Sentinel 2 permet de détecter la dégradation des chemins forestiers à distance. En intégrant l'indice de position topographique (TPI), l'indice de rugosité de terrain (TRI) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) le modèle retenu prédit la dégradation des chemins à ± 9 % d'erreur.

Cette étude a permis de fournir de nouvelles connaissances et une meilleure compréhension de la dégradation actuelle du réseau routier en milieu forestier. Les informations obtenues des deux modèles de prédictions développés sont grandement utiles pour le maintien et la durabilité de l'accès au territoire forestier boréal canadien à court et à long terme.

Mots clés : aménagement, accès, indices spatiaux, LiDAR aéroporté, rugosité, Sentinel 2, topographie.

2.2 Introduction

Les chemins forestiers sont une perturbation anthropique qui modifie considérablement la connectivité et la dynamique naturelle de la forêt boréale canadienne. Sa densification constante soulève plusieurs questions sur ses impacts économiques, environnementaux et sociaux. D'ailleurs, ces répercussions sont très bien documentées et étudiées à travers le monde (Bourgeois *et al.*, 2005 ; Caliskan, 2013 ; Fahrig et Rytwinski, 2009 ; Forest Practices Board, 2015 ; Gucinski *et al.*, 2001 ; Luce et Wemple, 2001). Cependant, les chemins ne perturbent pas les écosystèmes forestiers seulement lors de leur construction. En effet, un manque d'entretien des chemins entraîne sa dégradation et il s'ensuit alors plusieurs conséquences, dont la contamination des cours d'eau et des habitats avoisinants, une augmentation des risques de collision et de prédation chez certains animaux (p. ex. caribou) et des risques d'accident pour les usagers, ainsi qu'une diminution de leur efficacité et des services écosystémiques de la forêt (Gucinski *et al.*, 2001 ; Ryan *et al.*, 2004). De plus, une présence de dégradation sur un chemin peut limiter l'accès au territoire forestier à tous les usagers (c.-à-d. industrie forestière, villégiateurs, entités gouvernementales, etc.) et augmenter considérablement les coûts d'entretien. Ainsi, afin de minimiser les risques reliés à la dégradation du réseau routier forestier, il devient primordial d'avoir une bonne compréhension et une bonne connaissance de son état actuel.

Il existe de nombreuses méthodes d'acquisition de données permettant de connaître l'état actuel des chemins forestiers, dont des données ponctuelles de la rigidité du chemin prises à l'aide d'un pénétromètre (Akgul *et al.*, 2019 ; Kaakkurivaara *et al.*, 2015), d'un radar à pénétration de sol (GPR) (Bianchini Ciampoli *et al.*, 2019 ; Salvi *et al.*, 2019) ou d'un déflectomètre (Kaakkurivaara *et al.*, 2015 ; McFarlane *et al.*, 1975 ; Thompson, 1975). Certaines approches reposent plutôt sur des observations visuelles, comme l'indice de l'état de la chaussée (*Pavement condition index* [PCI]) (Karim *et al.*, 2016 ; Loprencipe et Pantuso, 2017 ; Setyawan *et al.*, 2015). La dégradation peut

aussi être enregistrée sous forme de données continues à l'aide d'un capteur monté sur un véhicule qui enregistre les variations ressenties lorsque ce dernier est en mouvement (Paterson, 1986). Les données obtenues permettent de générer des indices de rugosité (voir Paterson, 1986) pour caractériser la qualité de la surface de roulement (Abulizi et al., 2016 ; Forslöf et Jones, 2015 ; Múčka, 2016 ; Prasad et al., 2013 ; Sayers, 1995). Il est aussi possible d'utiliser un véhicule muni d'un laser mobile (*Mobile laser scanning*) (Akgul et al., 2017 ; Ferenčík et al., 2019).

Tous ces outils ont prouvé plus d'une fois leur potentiel à estimer la dégradation d'un chemin. Toutefois, à ce jour leur application est très rare en milieu forestier (Akgul *et al.*, 2017 ; Kaakkurivaara *et al.*, 2015). De plus, leur utilisation nécessite un inventaire systématique sur le terrain qui requiert des coûts élevés en termes de temps, d'argent et de ressources (Zhang, 2008). Ainsi, ces approches sont difficilement applicables au réseau des chemins forestiers canadiens, puisqu'il s'étend sur plus d'un million de kilomètres dans des secteurs relativement éloignés. Les outils à distance, dont le LIDAR aéroporté (*Light detecting and ranging*) et les images satellites multispectrales sont des méthodes qui semblent plus prometteuses, car elles offrent la possibilité de couvrir de vastes zones (Hyypä et al., 2000) sans avoir à se déplacer sur l'entièreté du réseau des chemins forestiers.

L'objectif de cette étude est de fournir une meilleure compréhension et de nouvelles connaissances spatio-temporelles de l'état du réseau des chemins forestiers canadiens. Pour ce faire, deux approches distinctes sont utilisées, soit 1) de construire un modèle prédictif de la dégradation des chemins forestiers gravelés et d'évaluer l'impact de la pente, du temps, de la perte de surface de roulement et de la largeur du chemin sur la présence de dégradation et 2) d'évaluer le potentiel des indices de topographie, rugosité et végétation extraits du LiDAR aéroporté et des images optiques Sentinel 2 pour estimer à distance la dégradation du réseau routier forestier.

2.3 Matériel et méthode

2.3.1 Localisation et caractéristiques des sites d'étude

Tableau 2.1 Caractéristiques des chemins forestiers gravelés étudiés au sein des trois secteurs d'étude et leurs données bioclimatiques (Blouin et al., 2008 ; Gosselin, 2002 ; Leboeuf, 2016).

Caractéristiques	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3
Cumul des chemins échantillonnés (km)	38	34,5	31
Élévation minimale et maximale des chemins échantillonnés (m)	318 - 483	364 - 527	282 - 579
Élévation moyenne des chemins échantillonnés (m)	393	430	407
Température annuelle moyenne (°C)	1,5	3,8	1
Précipitations annuelles moyennes (mm)	875	928	999
Type de végétation	Sapinière à bouleau blanc	Sapinière à bouleau jaune	Sapinière à bouleau blanc

La zone d'étude se situe dans la forêt boréale aménagée de l'est du Canada et se divise en trois secteurs d'environ 100 km² (Figure 2.1) représentatifs de l'activité forestière canadienne. Les secteurs se trouvent plus particulièrement dans la province de Québec à 1) l'est de Senneterre 2) au sud-ouest de La Tuque et 3) à l'ouest de Dolbeau-Mistassini. L'ensemble de ces secteurs se définit par un relief relativement plat (Tableau 2.1) dont le dépôt de surface est constitué de till glaciaire. Le climat de ces régions est continental froid, c'est-à-dire avec des étés tempérés sans saison sèche. Cependant, chaque secteur rencontre des particularités différentes puisque cette province canadienne est caractérisée par un gradient de précipitations longitudinal et de température latitudinale (Tableau 2.1). En effet, à l'échelle du Québec, les

précipitations sont généralement moins abondantes dans l'ouest que dans l'est, alors que les températures sont plus élevées dans le sud que le nord.

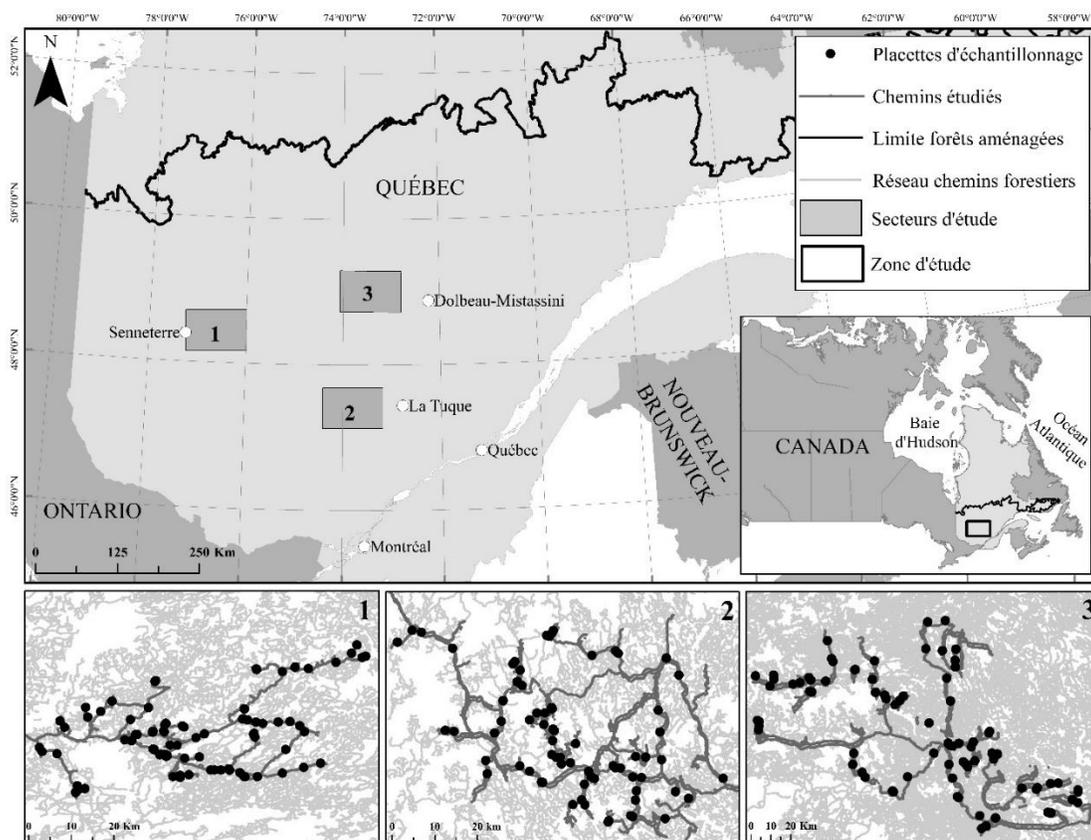


Figure 2.1 Localisation des trois secteurs d'étude dans la province de Québec à l'est du Canada. Aperçu des sites d'échantillonnage (points noirs) et du réseau des chemins forestiers étudiés (gris foncé) au sein des trois secteurs respectifs.

2.3.2 Dispositif expérimental

Dans le but de quantifier la dégradation des chemins forestiers, nous avons utilisé un dispositif expérimental temporaire de 207 placettes d'échantillonnage réparties sur l'ensemble des trois secteurs à l'été 2019. La sélection des chemins reposait sur leur largeur (4 à 14 m), leur pente (0 à 16 %) et le temps depuis le dernier entretien (0 à

46 ans), des variables qui sont jugées décisives pour expliquer la dégradation observée (Ciobanu et al., 2012 ; Desautels et al., 2009 ; Jetté et al., 1998 ; Ryan et al., 2004). À des fins de caractérisation représentative des chemins sur le territoire, nous avons échantillonné les chemins selon trois catégories de largeur (c.-à-d. étroite [4 à < 7 m], moyenne [≥ 7 à < 9,5 m] et large [$\geq 9,5$ à 14 m]), selon une pente ≤ 4 % et >4 % et selon deux catégories de temps depuis le dernier entretien (c.-à-d. récent [2015-2019], ancien [1970-2014]). Les largeurs utilisées correspondent aux standards de construction d'un chemin forestier gravelé lorsque sa vitesse de déplacement est de 30, 50 et 70 km/h respectivement, une autre variable qui influencerait la dégradation des chemins forestiers (Ryan et al., 2004). Les intervalles de pente retenus prennent en considération leur effet respectif sur la dégradation par l'accumulation des eaux (Fannin et Lorbach, 2007 ; Ryan et al., 2004) ou par le ruissellement des eaux et l'accélération des véhicules (Dittmer et Johnson, 1975 ; Dobiaš, 2005 ; Jetté et al., 1998). Les données d'entretien proviennent des relevés historiques fournis par la compagnie forestière Produits forestiers Résolu © qui effectue des travaux d'aménagement forestiers dans les trois secteurs d'étude.

En fonction des catégories de variables prédéfinies, cinq répétitions ont été effectuées. Nous avons utilisé des tronçons de 50 m de long munis d'un dispositif expérimental de cinq transects perpendiculaires disposés aux intervalles 0, 10, 25, 40 et 50 m, où nous avons mesuré au centimètre près la largeur et la profondeur de toutes les formes de dégradation présentes (nids-de-poule, ornières, roulières, érosion, émergence de la sous-fondation, planche à laver). La longueur de l'échantillon reposait sur la faisabilité de la collecte de données à offrir une vision continue de la dégradation à une échelle pouvant être facilement détectable avec les outils à distance. La largeur des transects correspondait à la largeur de la surface de roulement actuelle (emplacement où il est possible de circuler à l'aide du véhicule motorisé lors de l'échantillonnage). En cumulant la longueur totale des transects perpendiculaires et de la dégradation observée sur ceux-ci, nous avons obtenu un pourcentage de dégradation par tronçon.

Les mesures de largeur du chemin ont permis de calculer le pourcentage de perte de surface de roulement (PPSR). Ce calcul nous informe de la différence enregistrée entre la largeur de surface de roulement initiale (LSRI) lors de la construction du chemin (observable par les extrêmes de la mise en forme lors de sa construction) et la largeur de surface de roulement actuelle (LSRA), identifiable par l'absence de végétation arbustive ou herbacée (Équation 2.1). Le PPSR se calcule selon l'équation suivante :

$$\text{PPSR} = \frac{\text{LSRI} - \text{LSRA}}{\text{LSRI}} * 100$$

(Équation 2.1)

2.3.3 Observation de la dégradation *in situ*

2.3.3.1 Pourcentage de dégradation observée

L'échantillon totalisait 103,5 km de chemin dont leur pourcentage de dégradation variait entre 0 et 82 %. Sur l'ensemble de la dégradation compilée, 42,4 % ont été observés sur les chemins de largeur étroite, 35,1 % sur des largeurs moyennes et 22,5 % sur des chemins larges. Les chemins dont l'entretien datait de cinq ans et moins étaient en moyenne dégradés à 17 %. Cette moyenne augmente à 33 % pour les chemins de 6-10 ans sans entretien, 41 % pour les 11-15 ans, 44 % pour les 16-20 ans, 46 % pour les >20 ans. Les chemins ayant un PPSR inférieur à 25 affichaient en moyenne 11 % de dégradation observée. Cette proportion augmente à 23 %, 40 % et 55 % pour les chemins avec un PPSR de 25 à <50, 50 et <75 et 75 à 100 respectivement. Les chemins forestiers de pente >4 % affichaient des taux de dégradation plus élevés (Figure 2.2).

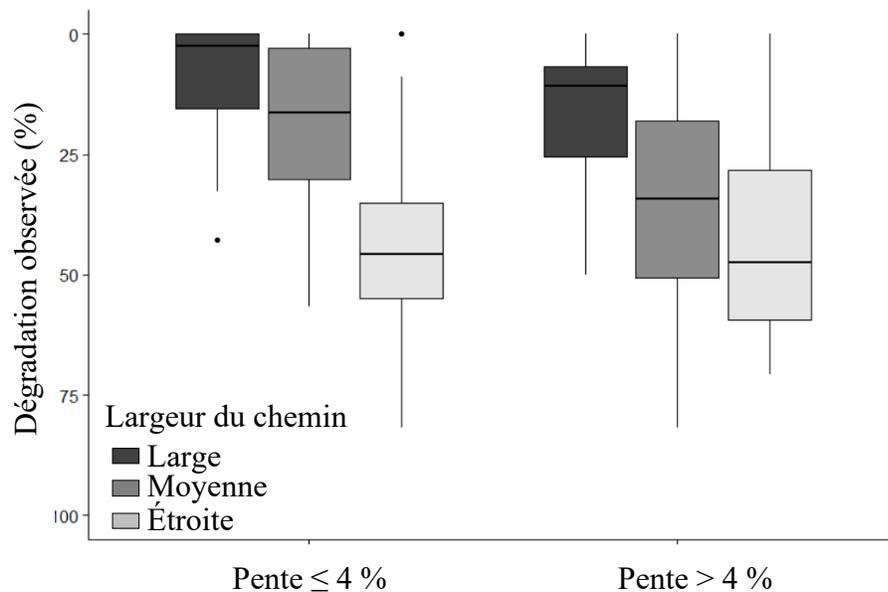


Figure 2.2 Boîte à moustaches de la dégradation des chemins en fonction de la largeur du chemin et de la pente. La ligne épaisse représente la médiane (50e percentile). Le carré représente la distribution des données entre les 25e et 75e percentiles, c'est-à-dire que 50 % de données se situent dans cet intervalle. Les lignes prolongées représentent la variabilité en dehors des percentiles supérieur et inférieur. Les points sont des valeurs extrêmes.

2.3.3.2 Formes de dégradation observées

Les formes de dégradation observées (Figure 2.3) au sein des placettes d'échantillonnage étaient, en ordre d'importance, les ornières (56 %), l'érosion (24 %), les roulières (10 %), l'émergence de la sous-fondation (6 %), les nids-de-poule (3 %) et les ondulations. La profondeur de ces formes variait entre 0 et 35 cm. La distribution des formes de dégradation changeait en fonction de la largeur des chemins (Figure 2.4) et de la pente (Figure 2.5), où les ornières et l'érosion étaient les plus récurrentes.



Figure 2.3 Formes de dégradation observées en ordre d'importance ; A : Ornières ; B : Érosion (par l'eau) ; C : roulières ; D : émergence de la sous-fondation ; E : nids-de-poule ; F : ondulations.

L'érosion occupait le plus de superficies sur les chemins les plus larges, tandis que les ornières étaient davantage présentes sur les chemins de largeur moyenne et étroite. Les chemins avec une pente $>4\%$ affichaient généralement une proportion plus grande de toutes les formes de dégradation, à l'exception des nids-de-poule (Figure 2.5).

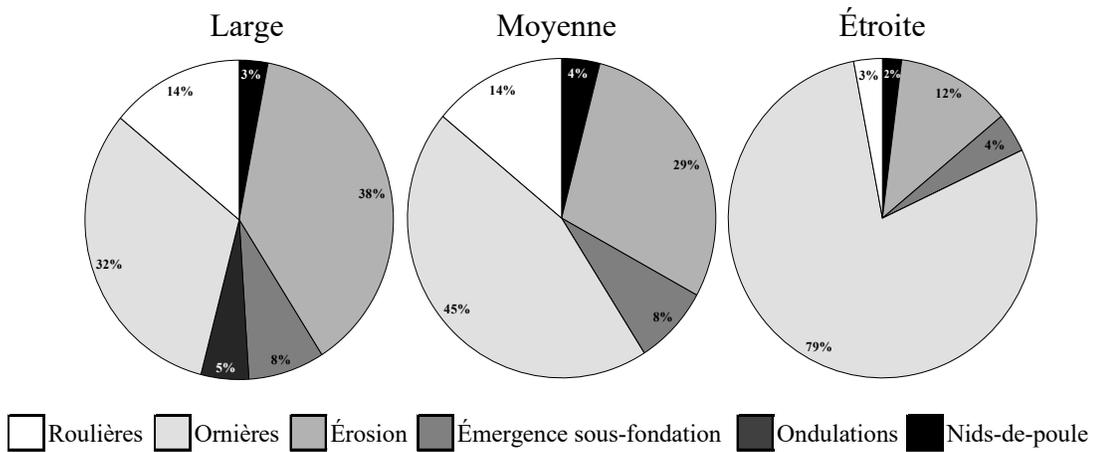


Figure 2.4 Proportion (%) de l'échantillon (cumulatif de tous les tronçons échantillonnés) qui se manifeste sous forme d'ornière, d'érosion, de roulière, d'émergence de la sous-fondation, de nids-de-poule et d'ondulations en fonction des trois largeurs de chemin.

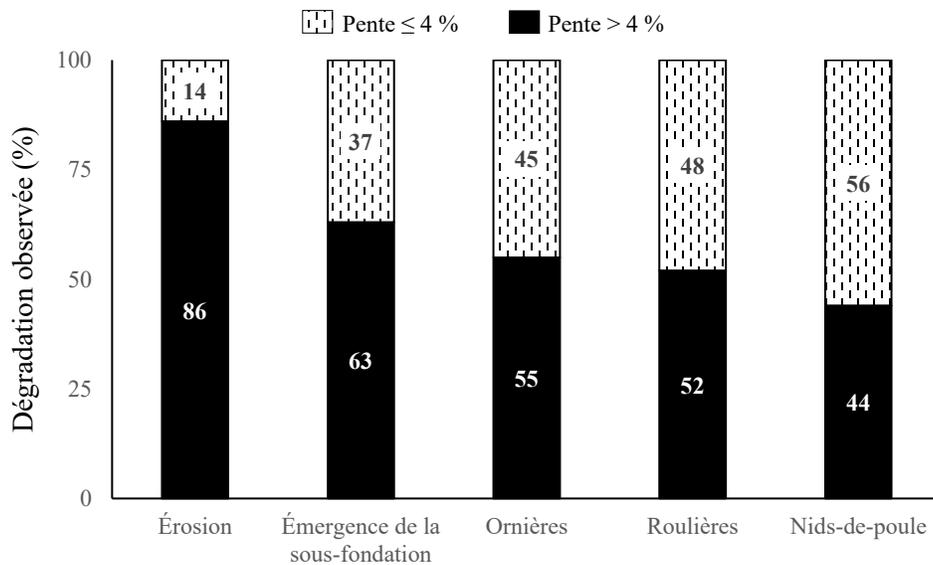


Figure 2.5 Proportion (%) de l'échantillon (cumulatif de tous les tronçons échantillonnés) dégradé par les différentes formes de dégradation pour les chemins en pente >4 % (boites noires) et en pente ≤4 % (boites hachurées). Les chiffres à

l'intérieur de barres représentent la valeur en pourcentage. Les ondulations ne sont pas présentées en raison de leur faible pourcentage d'observation.

2.3.4 Détection de la dégradation à distance

La dégradation sur une surface de roulement tend à se manifester par des dépressions (ornières, roulières, nids-de-poule, érosion et planche à laver) de profondeurs variées. Selon Kiss et al. (2015), la variation de la topographie et les fluctuations de la surface de roulement sont des indicateurs efficaces pour détecter la dégradation sur un chemin. De plus, en milieu forestier, la végétation est souvent présente sur un chemin lorsque son entretien est limité et est souvent associée à la dégradation (Ryan et al., 2004). Des indices de topographie, de rugosité (fluctuations) et de végétation ont été utilisés pour détecter la dégradation à distance (Tableau 2.2). Ces indices spatiaux ont été générés à l'aide des MNT et MHC LiDAR (source : MFFP, 1 m de résolution, 2 à 4 points par m², acquisition à l'été 2017 et 2018) et d'images multispectrales Sentinel 2 (source : USGS Earth Explorer, 10 m de résolution, acquisition été 2019, couverture nuageuse <10 % [Annexe A]).

Pour chaque indice extrait, la valeur moyenne, maximale, minimale et l'écart-type des pixels correspondant aux zones de chaque tronçon échantillonné ont été calculés. En fonction des indices décrits au Tableau 2.2, nous avons aussi calculé 1) le pourcentage de dépressions issu du TPI, soit le pourcentage de pixels au sein des placettes qui avaient des valeurs inférieures à zéro 2) le pourcentage de formes concaves issu du CSI, soit le pourcentage de valeurs inférieures à zéro (sauf pour CSI transversal que les valeurs supérieures à zéro expriment des formes concaves) et 3) le pourcentage de présence de végétation avec les valeurs de MHC supérieures à 1 m. Nous avons défini un seuil de 1 m pour cet indice, puisqu'à cette limite un chemin devient généralement impraticable en véhicule.

Tableau 2.2 Descriptions des indices spatiaux utilisés pour estimer la dégradation des chemins forestiers à distance.

Indices utilisés		Explications
Topographie		
TPI	Indice de position topographique (Weiss, 2001)	Mesure la différence topographique de chaque pixel central en fonction de l'élévation moyenne de son voisinage.
TWI	Indice d'humidité topographique (Beven et Kirkby, 1979)	Mesure le nombre de cellules voisines qui s'écoulent dans la cellule centrale. Utilise la pente locale > 0 (convertie en radian) pour déterminer la direction et ensuite les emplacements d'accumulation des écoulements (FA).
Rugosité		
CSI	Indice de courbure de la surface	Permet de générer la courbure longitudinale (parallèle à la pente) [CSII], transversale (perpendiculaire à la pente) [CSIt] et standard (association des deux courbures) [CSIs] d'une surface.
TRI	Indice de rugosité de terrain (Riley et al., 1999)	Mesure l'hétérogénéité du terrain. Utilise la valeur minimale et maximale du voisinage d'un pixel central pour connaître les changements d'élévation.
Végétation		
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée (Tarpley et al., 1984)	Calcule la différence entre la réflectance des longueurs d'onde émises par la lumière du soleil dans le proche infrarouge (PIR) et dans la bande visible rouge.
MHC	Modèle de hauteur de canopée	Utilise le premier retour du nuage de points acquis par le laser LiDAR pour générer un modèle de hauteur de canopée.

2.3.5 Analyses statistiques

Le jeu de données retenu a été divisé en deux groupes (75 % élaboration du modèle et 25 % validation, choisis aléatoirement) et organisé selon les deux approches ; les

variables Terrain (pente, largeur, temps et PPSR obtenus des relevés terrain) et les variables Télédétection (les métriques extraites des indices du Tableau 2.2).

2.3.5.1 Construction des modèles de régression

Avec les deux approches respectives, des modèles de régressions bêta ont été construits pour déterminer l'effet des variables respectives sur la dégradation. Pour ce faire, le pourcentage de dégradation a été converti dans un intervalle de 0 à 1. Cette technique est une alternative aux régressions linéaires lorsque la variable dépendante s'exprime sous forme de données continues restreintes dans cet intervalle (Ferrari et Cribari-Neto, 2004) et que les suppositions de normalité et d'homogénéité de la variance des résidus ne sont pas respectées (Smithson et Verkuilen, 2006). La régression bêta se base sur la supposition que la réponse suit une distribution bêta et est connectée à ses variables prédictives avec un lien logit (Cribari-Neto et Zeileis, 2009). Cette distribution tend à être plus flexible lorsqu'il s'agit de modéliser des intervalles ou des proportions puisqu'elle peut avoir différentes formes, contrairement à la régression linéaire qui ne déroge pas de sa forme linéaire (Ferrari et Cribari-Neto, 2004). Puisque les valeurs 0 et 1 ne peuvent être prises en charge par la régression utilisée, les recommandations de Smithson et Verkuilen (2006) ont été appliquées afin de transformer l'intervalle de données entre 0,005 et 0,995 selon l'équation suivante :

$$y'' = [y (N-1) + \frac{1}{2}]/N \quad (\text{Équation 2.2})$$

où y'' = *dégradation transformée* (0,005 à 0,995), y = *dégradation observée* (0 à 1) et N = *taille de l'échantillon*.

La sélection des variables à intégrer dans la régression bêta a été réalisée avec un test de Spearman entre la *dégradation transformée* et les prédicteurs au sein des deux

approches. Les variables Terrain retenues ($p < 0.05$) sont la pente, le temps depuis le dernier entretien, le PPSR et la largeur du chemin, où l'ensemble des variables sont des données continues à l'exception de la largeur du chemin qui est une donnée catégorique. Pour chaque indice de l'approche Télédétection, la métrique avec le coefficient de corrélation le plus élevé a été retenue, soit le pourcentage de dépression issu du TPI, la moyenne de TRI, la moyenne de NDVI, le pourcentage de présence de végétation issu du MHC, l'écart-type du TWI et l'écart-type du CSI transversal.

Un total de 10 000 permutations a été appliqué aux deux approches, où aucune interaction n'a été détectée. L'effet aléatoire de la région et de la largeur des chemins a été vérifié et aucun n'était significatif (p -value $< 0,05$). L'ordonnée à l'origine a été forcée à zéro pour les modèles de l'approche Terrain, dans le but de connaître le taux de dégradation réelle observée (et non moyenne) en fonction de la largeur du chemin.

2.3.5.2 Sélection des modèles candidats

Pour déterminer la combinaison de variables qui permettrait d'estimer la dégradation, une sélection de modèles candidats par AIC (fonction *dredge* du package *MuMIn* [Bartoń, 2020] du logiciel R [R Development Core Team, 2011]) a été effectuée au sein des deux approches (c.-à-d. *dégradation ~ Terrain* et *dégradation ; dégradation ~ Télédétection*). Le AICc a été utilisé en raison d'un n/k (c.-à-d. échantillons/paramètres) inférieur à 40 (Symonds et Moussalli, 2011). Les modèles candidats ont été retenus jusqu'à concurrence d'un poids (w_i) d'AICc = 1 et d'un delta AICc < 2 (Symonds et Moussalli, 2011). La probabilité qu'un prédicteur soit une composante du meilleur modèle a été calculée en additionnant les w_i des modèles candidats au sein desquelles elles apparaissent (Symonds et Moussalli, 2011).

À des fins de validation, le modèle de régression candidat résultant pour chaque approche a été validé en se référant aux graphiques de diagnostics des résidus. En

raison d'une forte hétéroscédasticité de la variance et l'asymétrie de la distribution bêta, les recommandations de Ferrari et Cribari-Neto (2004) ont été appliquées en utilisant les résidus de *Pearson* plutôt que les résidus bruts.

2.3.5.3 Prédiction et validation des modèles candidats

La dégradation a été prédite à l'aide du modèle ayant obtenu le w_i le plus performant au sein des deux approches avec la fonction *predict* du package *betareg* (Zeileis et al., 2020). Pour effectuer les prédictions, la régression bêta utilise un lien logit () sur les coefficients estimés par maximum de vraisemblance (Smithson et Verkuilen, 2006). Des simulations de la dégradation ont ensuite été effectuées. En comparant le taux de dégradation prédit aux données réelles, il a été possible de valider la performance des modèles en calculant le biais (erreur moyenne échelonnée [SME], surestimation et sous-estimation), la précision (variance) et l'exactitude (erreur quadratique moyenne échelonnée [SMSE]) (Walther et Moore, 2005).

2.4 Résultats

2.4.1 Modèles de régression de la dégradation

Pour l'approche Terrain, les quatre variables (c.-à-d. largeur, pente, temps et perte de surface de roulement) ont été retenues pour construire le modèle de régression (Tableau 2.3). Le pourcentage de dépression issu du TPI, l'écart-type du TWI, l'écart-type du CSI transversal, la valeur moyenne de TRI, la valeur moyenne de NDVI et le pourcentage présence de végétation du MHC sont les métriques retenues pour construire le modèle de régression de l'approche Télédétection.

Tableau 2.3 Coefficients de corrélation (R) entre la dégradation et les indices extraits du LiDAR ou Sentinel 2 (c.-à-d. NDVI) et les variables Terrain. Les métriques utilisées sont l'écart-type, la valeur minimale, maximale, moyenne et le pourcentage de dépression et de végétation. Les astérisques représentent la statistique significative (* p-value $\leq 0,05$, ** p-value $\leq 0,01$ et *** p-value $\leq 0,001$) du coefficient de corrélation. En présence d'un point ou en l'absence d'astérisque, le coefficient de corrélation n'est pas significatif ($p > 0,05$).

	Indices	Métrique	R			Indices	Métrique	R		
Topographie	TPI	Minimum	-0,01		Rugosité	TRI	Minimum	0,26	***	
		Maximum	0,17	*			Maximum	0,05		
		Moyenne	-0,15	*			Moyenne	0,32	***	
		Écart-type	0,34	***			Écart-type	0,06		
		% dépressions	0,36	***		Minimum	0,57	***		
	TWI	Minimum	-0,16	*	Végétation	NDVI	Maximum	0,49	***	
		Maximum	0,04				Moyenne	0,55	***	
		Moyenne	0,07				Écart-type	-	***	
		Écart-type	0,41	***			Écart-type	0,33		
		% dépressions	0,33	***		Minimum	0,2	**		
Rugosité	CSIs	Minimum	-0,09		MHC	Maximum	0,3	***		
		Maximum	0,14	.		Moyenne	0,31	***		
		Moyenne	-0,22	**		Écart-type	0,24	***		
		Écart-type	0,41	***		%				
		% dépressions	0,33	***		végétation	0,48	***		
	CSIt	Minimum	-0,18	**	Variables		R			
		Maximum	0,24	***	Terrain	Largeur	0,56	***		
		Moyenne	-0,13	.		Pente	0,54	***		
		Écart-type	0,49	***		Temps	0,15	*		
		% dépressions	0,24	***		PPSR	0,59	***		
CSII	Minimum	-0,07								
	Maximum	0,03								
	Moyenne	0,25	***							
	Écart-type	0,28	***							
	% dépressions	0,43	***							

2.4.2 Sélection des modèles candidats

En fonction du poids d'AICc, l'approche Terrain a ressorti trois modèles candidats, alors que l'approche Télédétection en a obtenu 25 (Tableau 2.4). Le modèle le plus performant est celui qui inclut les quatre prédicteurs sélectionnés préalablement (largeur, pente, temps et PPSR). Selon le w_i , ce modèle a 93 % de probabilité d'être un modèle représentatif de la réalité pour expliquer la dégradation. En accumulant les poids d'AICc, la pente et le PPSR ont une probabilité de 100 % d'être un bon prédicteur de la dégradation, puisqu'ils se retrouvent dans les trois modèles proposés. Cette même probabilité est de 99,9 % pour la largeur du chemin et de 93 % pour le temps, puisque ces variables ont été exclues du troisième et du deuxième modèle Terrain respectivement.

Pour l'approche Télédétection, les meilleurs modèles candidats sélectionnés intègrent la moyenne de NDVI, la moyenne de TRI, le pourcentage de dépression du TPI, l'écart-type du CSI transversal ou l'écart-type du TWI. La moyenne de NDVI est présente dans tous les modèles proposés, ayant ainsi 100 % de probabilité d'être un bon prédicteur de la dégradation. Cette même probabilité diminue 96 % pour la moyenne de TRI, à 67 % pour le pourcentage de dépression issu du TPI, 26 % pour le pourcentage de présence de végétation du MHC, 31% pour l'écart-type du CSI transversal et 35 % pour l'écart-type du TWI.

Tableau 2.4 Présentation des modèles candidats de l'approche Terrain et Télédétection en fonction de l'AICc, du delta (Δ) et du poids (w_i) d'AICc. Les encadrés gris présentent les variables retenues dans les modèles candidats. 36

Approche Terrain

Modèle	Pente	Largeur	Temps	PPSR	AICc	Δ	w_i
1					-208,60	0,00	0,93
2					-203,20	5,39	0,06
3					-198,60	10,07	0,01

Approche Télédétection

Modèle	Moyenne NDVI	Moyenne TRI	% dépression TPI	% végétation MHC	Écart-type CSIt	Écart-type TWI	AICc	Δ	w_i
1							-179,60	0,00	0,28
2							-177,50	2,14	0,09
3							-177,50	2,14	0,09
4							-177,50	2,17	0,09
5							-177,30	2,34	0,09
...									
24							-168,80	10,82	0,001
25							-167,40	12,22	0,001

2.4.3 Prédiction et validation des modèles candidats

Tableau 2.5 Coefficients et ordonnées à l'origine (différents selon les trois catégories de largeur de chemin) estimés et p-value des prédicteurs des modèles de la régression bêta retenus pour les approches Terrain et Télédétection.

Approche Terrain			
Prédicteurs	Estimations	p-value	
Pente	0,09	3,42 e-08	***
Largeur : large	-3,10	< 2e-16	***
Largeur : moyenne	-2,80	< 2e-16	***
Largeur : étroite	-2,38	< 2e-16	***
Temps (entretien)	0,03	0,006 18	**
PPSR	0,02	2,22 E-07	***
Approche Télédétection			
Prédicteurs	Estimations	p-value	
(Intercept)	-4,09	< 2e-16	***
Moyenne TRI	3,43	6,46 e-06	***
Moyenne NDVI	2,76	7,73 e-12	***
% dépressions TPI	0,02	0,0285	*

Note : *** $p \leq 0,001$, ** $p \leq 0,01$ et * $p \leq 0,05$.

L'équation 2.3 présente la prédiction de la dégradation pour un chemin large à l'aide des estimations du modèle retenu pour l'approche Terrain en utilisant le lien logit requis pour effectuer la régression bêta (Tableau 2.5) :

$$\text{Dégradation (\%)} = \text{Invlogit} (-3,10 + \text{Pente} * 0,09 + \text{Temps} * 0,03 + \text{PPSR} * 0,02)$$

(Équation 2.3)

L'équation 2.4 prédit la dégradation à l'aide des estimations du modèle retenu pour l'approche Télédétection (Tableau 2.5) en intégrant les indices retenus :

$$\text{Dégradation (\%)} = \text{Invlogit} (-4,09 + \text{TRI} * 3,43 + \text{NDVI} * 2,76 + \text{TPI} * 0,02)$$

(Équation 2.4)

2.4.3.1 Validation des modèles

Les modèles de prédiction des approches Terrain et Télédétection ont obtenu un pseudo- R^2 de 0,43 et 0,34 et une erreur moyenne de prédiction de la dégradation de 8 et 9 % respectivement. En comparant les prédictions aux données réelles (c.-à-d. dégradation minimale = 0 %, maximale = 82 %), les valeurs minimales prédites sont similaires au niveau des deux approches (différence de 0,1 %), bien qu'aucune ne soit égale à zéro. Les prédictions maximales sont inférieures de 5 et 15 % pour les modèles des approches Terrain et Télédétection respectivement. La validation croisée (Tableau 2.6) démontre que les deux modèles ont un biais, une précision et une exactitude inférieurs à 5 %.

Tableau 2.6 Validation des modèles de prédictions retenus pour les approches Terrain et Télédétection.

Approche	Échantillon	SME	Surestimation	Sous-estimation	Variance	SMSE	Dégradation prédite	
							minimale	maximale
Terrain	Élaboration (75 %)	0,04	52 %	48 %	0,03	0,08	5,8 %	76,7 %
	Validation (25 %)	0,02	50 %	50 %	0,03	0,02		
Télédétection	Élaboration (75 %)	0,04	51 %	49 %	0,03	0,09	5,9 %	67,2 %
	Validation (25 %)	0,03	52 %	48 %	0,03	0,04		

2.4.3.2 Courbes de prédictions de la dégradation

La Figure 2.6 simule la prédiction de la dégradation à l'aide de l'équation 2.3 (approche Terrain) et démontre que le taux de dégradation des chemins forestiers est accentué plus la valeur des prédicteurs (pente, perte de surface de roulement ou temps) augmente individuellement (Figure 2.6a). Le taux de dégradation prédit est toujours plus faible pour les chemins larges, alors que les chemins de largeur moyenne et étroite affichent en moyenne 1,7 fois et 2,5 fois plus de dégradation respectivement. Puis, lorsque tous les prédicteurs sont combinés (Figure 2.6 b), le taux de dégradation conserve cette disparité entre les largeurs de chemins et les prédictions de la dégradation sont plus élevées.

La Figure 2.7 montre les prédictions de la dégradation issue de l'équation 2.4 (approche Télédétection) et établit que le taux de dégradation s'accroît plus la valeur moyenne du NDVI, la valeur moyenne du TRI et le pourcentage de dépression du TPI augmentent individuellement (Figure 2.7, lignes pleines). Lorsque les trois prédicteurs sont combinés pour déterminer le taux de dégradation, la dégradation est alors davantage élevée (Figure 2.7, lignes pointées).

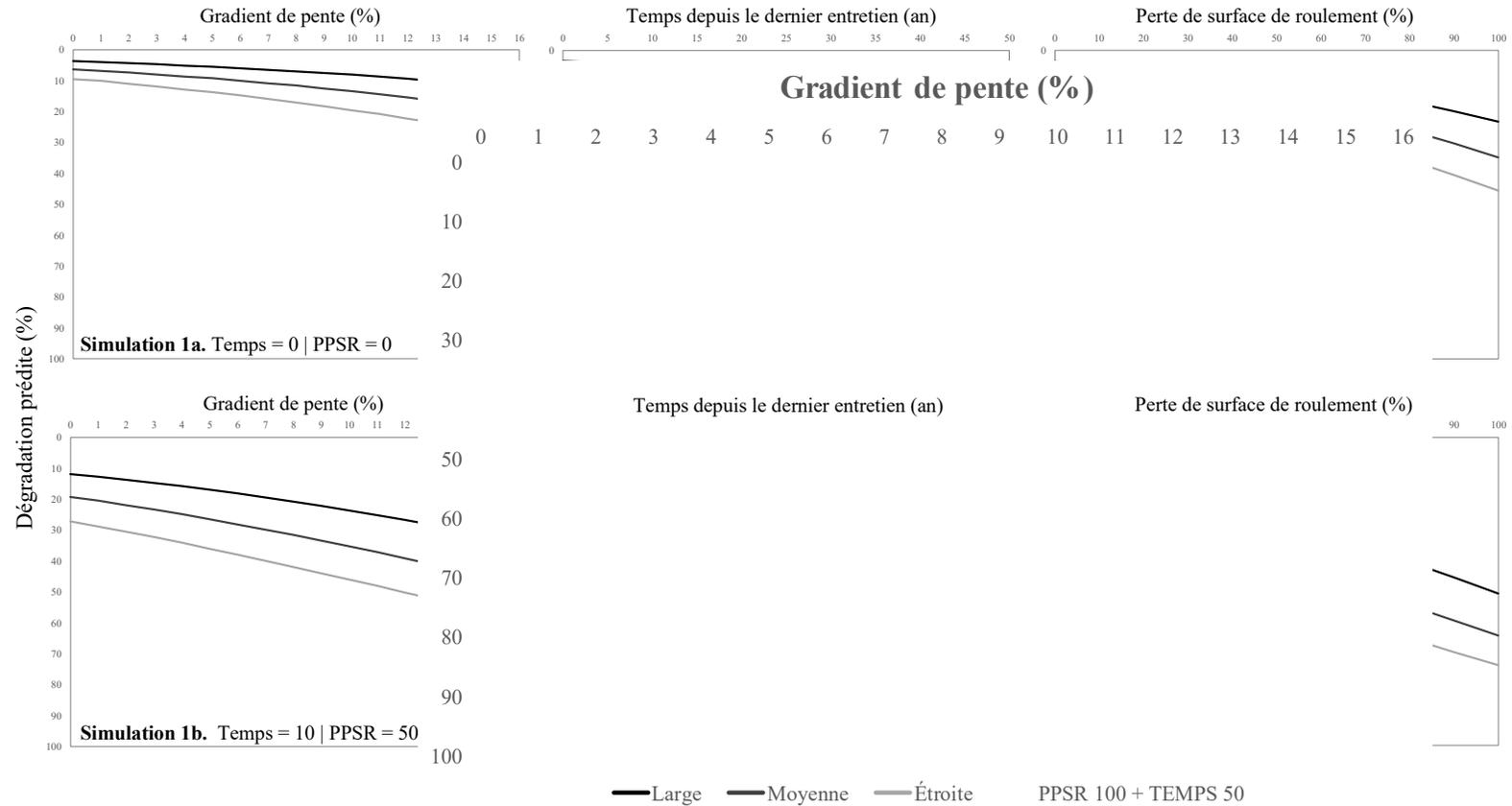


Figure 2.6 Courbes de prédictions de la dégradation (%) simulées à partir des estimations du modèle de régression bêta retenu pour l'approche Terrain en fonction de différentes valeurs de pente, de temps et de PPSR selon les trois largeurs de chemin. Les simulations (a) présentent le taux de dégradation prédit lorsque tous les prédicteurs, sauf celui retenu sur les graphiques

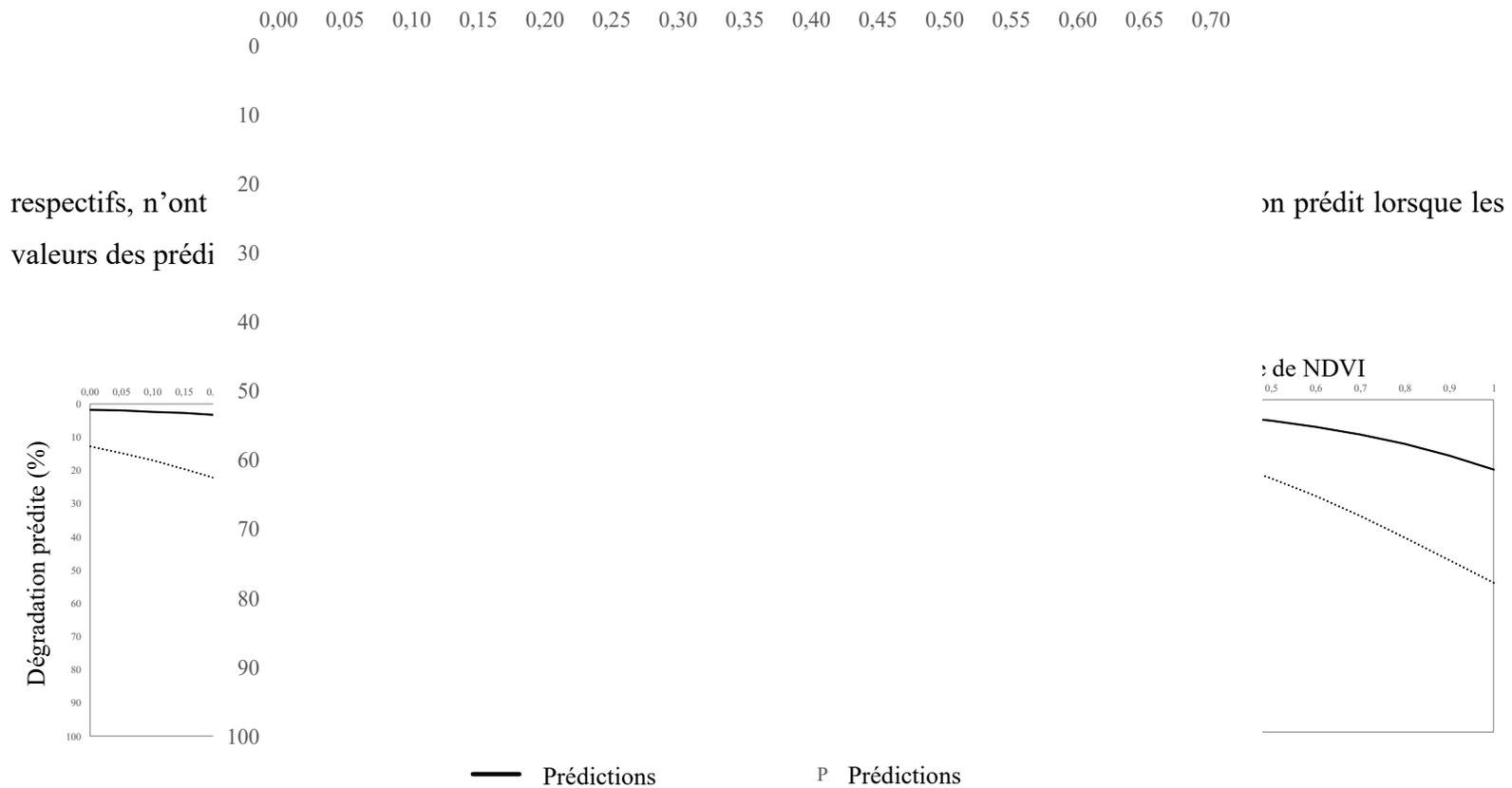


Figure 2.7 Courbes de prédictions de la dégradation (%) simulées à partir des estimations du modèle de régression bêta retenu pour l'approche Télédétection. Pour chacun des prédicteurs (moyenne NDVI, moyenne TRI, pourcentage de dépression du TPI), les courbes simulent leur effet individuel (lignes pleines) et combiné (avec les deux autres prédicteurs à valeur fixe ; lignes pointées). La valeur fixe utilisée pour les courbes combinés correspond à la moyenne des prédicteurs, soit moyenne TRI=0,22, moyenne NDVI=0,5 et pourcentage de dépression du TPI=50%.

2.5 Discussion

2.5.1 Performance des modèles de prédiction de la dégradation

L'absence d'étude proposant un modèle prédictif de la dégradation en milieu forestier ne nous permet pas de comparer judicieusement la performance de notre modèle de régression proposé par l'approche Terrain. Toutefois, les études sur la dégradation des routes et autoroutes en zones urbaines abondent. Par exemple, George et al. (1989) ont utilisé 6 variables, dont l'âge de la route, pour prédire la dégradation de la chaussée asphaltée et ont obtenu un R^2 de 0,75. De leur côté, Xu et al. (2014) ont utilisé 12 variables, dont l'âge de la route et le flux de transport journalier, pour créer des modèles prédictifs de la dégradation dont le R^2 s'élevait à $0,88 \pm 0,1$. Ces résultats sont en partie expliqués par le fait que les standards de construction des routes asphaltées diffèrent très peu, contrairement aux chemins forestiers (Gouvernement de la Colombie-Britannique, s.d.), notamment en raison des conditions environnementales et structurelles qui varient d'un chemin forestier à l'autre. De plus, notre modèle de régression logistique fournit un pseudo- R^2 de McFadden, une statistique qui tend à être inférieure au R^2 des modèles linéaires plus standards (McFadden, 1977). Toutefois, le pseudo- R^2 obtenu représenterait un bon ajustement du modèle à la réponse étudiée (McFadden, 1977).

Au niveau de l'exactitude du modèle de l'approche Terrain, nos résultats sont similaires à ceux de Heidari et al. (2018) qui ont développé un modèle de régression logistique dans le but de prédire la dégradation des chemins forestiers en Iran. Sur les 19 variables utilisées pour tenter d'expliquer la dégradation, la pente, l'âge du chemin, le matériau, l'épaisseur de la surface de roulement et le flux de transport étaient les variables significatives (p -value $< 0,05$) qui ont été retenues dans leur modèle de prédiction, dont l'exactitude des prédictions variait entre 82 à 89 %.

Le pseudo- R^2 du modèle de l'approche Télédétection indiquerait aussi un bon ajustement du modèle (McFadden, 1977). Encore une fois, peu d'études se sont attardées à détecter la dégradation des chemins forestiers en utilisant des indices extraits des données LiDAR et des images optiques. Malgré tout, les erreurs de prédiction de notre modèle sont similaires à celles de Kiss et al. (2016) qui ont eu recours au LiDAR pour extraire un indice de topographie (TPI) et de fluctuation (SE ; indice d'élévation normalisé) pour classer la qualité (c.-à-d. bonne et satisfaisante) des chemins forestiers à différente résolution.

2.5.2 Variables retenues pour estimer la dégradation

2.5.2.1 Approche Terrain

a) Largeur du chemin

Les trois largeurs de chemin utilisées dans cette étude représentaient les standards de construction d'un chemin en fonction d'une vitesse de déplacement prédéfinie (c.-à-d. large = 70 km/h ; moyenne = 50 km/h ; étroite = 30 km/h). Jusqu'à présent, aucune étude établissant que la largeur du chemin aurait une incidence sur le taux de dégradation d'un chemin n'a été publiée dans la littérature scientifique ou de vulgarisation. Malgré tout, nos résultats démontrent que le pourcentage de dégradation diffère en fonction de la largeur du chemin, témoignant des lacunes qui découlent des standards de construction du réseau. Au Canada, les chemins les plus larges sont des chemins d'accès primaire à la forêt et sont donc construits avec une vision à long terme (p. ex. Québec >25 ans [MFFP, s.d.] ; Alberta >20 ans [Gouvernement de l'Alberta, 2016] ; Yukon >10 ans [FMB, 2015] ; Manitoba >20 ans [Manitoba Conservation and Water Stewardship, 2012]). Ainsi, leur sous-fondation est constituée de gravier et possède un fort taux de compaction, ce qui permet à la structure d'être plus performante et d'éviter que la dégradation s'installe rapidement. Les chemins plus étroits à moyens

ne sont pas munis de ces standards, puisque leur construction repose sur une vision à plus court terme et donc d'une sous-fondation constituée de sol minéral, sol organique ou débris végétaux (MFFP, s.d.). Ces matériaux ne permettent pas un aussi bon taux de compaction, faisant en sorte que le passage successif de véhicule crée des dépressions plus aisément sur la surface de roulement (Adlinge et Gupta, 2013 ; Akgul *et al.*, 2019 ; Kiss *et al.*, 2015 ; O'mahony *et al.*, 2000) par la présence préférentielle notamment d'ornières et de roulières (Ciobanu et al., 2012). D'ailleurs, les résultats présentaient justement une plus forte récurrence d'ornières plus la largeur du chemin se rétrécissait.

b) Pente

L'intégration de la pente dans le modèle de l'approche Terrain est corroborée par de nombreux ouvrages qui témoignent de l'importance de cette variable sur le taux de dégradation d'un chemin forestier (Ciobanu *et al.*, 2012 ; Desautels *et al.*, 2009 ; Dittmer et Johnson, 1975 ; Dobiaš, 2005 ; Fannin et Lorbach, 2007 ; Heidari *et al.*, 2018 ; Ryan *et al.*, 2004). La dégradation sur un chemin en pente serait principalement causée par l'érosion en raison des eaux de ruissellement (Dittmer et Johnson, 1975 ; Dobiaš, 2005) et par l'accélération des véhicules (Ciobanu et al., 2012 ; Fannin et Lorbach, 2007). Nos résultats concordent avec ces informations, puisque les chemins échantillonnés en pente plus élevée affichaient une prédominance d'érosion, induite par les eaux de ruissellement. Puis, la présence notable d'émergence de la sous-fondation en pente forte recoupe les conclusions de Ciobanu et al. (2012) qui ont noté un impact significatif de l'accélération et de la décélération des véhicules sur l'érosion de la surface de roulement lorsque ces derniers montent ou descendent un chemin en pente, puisque ces processus mettent à nu la sous-fondation du chemin.

Les proportions similaires d'ornières et de roulières dans les deux catégories de pente nous indiquent que d'autres facteurs, comme le flux de transport et le manque de

compaction du chemin (Ciobanu et al., 2012 ; Desautels et al., 2009 ; Fannin et Lorbach, 2007), peuvent influencer leur présence sur la surface de roulement. Ainsi, nous notons qu'une pente faible (≤ 4 %) n'est pas synonyme d'absence de dégradation. D'ailleurs, les résultats montraient un taux élevé de nids-de-poule sur les chemins inférieurs à 4 % de pente. Ces observations concordent ainsi avec les lignes directrices de Ryan et al. (2004) qui mentionnent qu'une pente inférieure à 3 % serait aussi à risque de dégradation, car elle entraîne la formation préférentielle de nids-de-poule. De telles récurrences sur la surface de roulement témoigneraient, dans ce cas, d'une accumulation des eaux de ruissellement (Fannin et Lorbach, 2007).

c) Temps depuis le dernier entretien

L'intégration de la variable temporelle dans la prédiction de la dégradation correspond avec la littérature. Pour minimiser la dégradation de la surface de roulement, de nombreux ouvrages stipulent qu'un entretien systématique et régulier est nécessaire (Ciobanu *et al.*, 2012 ; Desautels *et al.*, 2009 ; Dobiaš, 2005 ; Heidari *et al.*, 2018 ; Jetté *et al.*, 1998 ; Ryan *et al.*, 2004). Nous notons cependant que les résultats présentaient des courbes où la dégradation en fonction du temps varie de moins de 5 % dans les cinq premières années. *A priori*, cette augmentation semble relativement faible, mais elle ne doit pas être négligée. Dans les premières années sans entretien, les formes de dégradation apparaissent graduellement. L'effet exponentiel dénoté sur les courbes de dégradation temporelle résulterait justement de ce processus d'agrandissement et d'ajout de dégradation au fil du temps.

d) Perte de surface de roulement

Dans le modèle de l'approche Terrain, la perte de surface de roulement témoigne d'un avancement de la végétation sur un chemin. Des études appliquées en écologie forestière (Aalto et al., 2013 ; Asbjornsen et al., 2011) relèvent que la présence de

végétation réduit considérablement la perte d'humidité et le taux d'évaporation du sol. Ce processus peut aussi s'appliquer dans le cas de notre étude, puisque l'avancement de la végétation aurait pour effet de contenir l'humidité au niveau du chemin et de la sous-fondation. La stabilité du chemin serait alors compromise (Ciobanu et al., 2012), entraînant par le fait même une augmentation de sa dégradation.

2.5.2.2 Approche Télédétection

Une des hypothèses de base de l'approche Télédétection de la présente étude stipulait que la topographie, la rugosité et la végétation avaient un rôle significatif dans l'estimation de la dégradation des chemins forestiers. Les données à distance LiDAR et Sentinel 2 ont démontré qu'il est effectivement possible d'estimer cette variable en combinant un indice topographie (TPI), de rugosité (TRI) et de végétation (NDVI). Ces indices sont très bien documentés dans la littérature et sont faciles à calculer et à interpréter. Généralement, ils sont appliqués à l'échelle du paysage, notamment pour détecter les processus hydrologiques (indices topographiques) (Vaze et al., 2010), géomorphologiques (indices rugosité) (Różycka et al., 2017) et pour déterminer les caractéristiques et les changements de la végétation et la biomasse (indices de végétation) (Meneses-Tovar, 2011). Toutefois, les résultats démontrent que ces indices ne se limitent pas seulement aux domaines auxquels ils sont généralement rattachés.

En effet, la présence d'une topographie ($TPI < 0$) plus basse au sein du chemin forestier permettrait de caractériser les dépressions les plus notables, soit les formes de dégradation les plus fréquentes. Les résultats démontraient que les ornières, les roulières et les écoulements sont les deux formes les plus récurrentes de l'étude. Selon nous, le pourcentage de dépression issu du TPI serait un bon estimateur de la présence des ornières, dépressions linéaires qui peuvent atteindre plus d'un mètre de largeur et de longueur. Les roulières et les nids-de-poule, qui se manifestent aussi par de fortes

dépressions de grande superficie sur la surface de roulement seraient tout aussi détectables à l'aide de cet indice.

Toutefois, nous sommes conscients que le pourcentage de dépression du TPI n'est peut-être pas l'outil le plus performant pour retrouver des formes de dégradation de petite superficie (<1 m), dont les écoulements, les ondulations et l'émergence de la sous-fondation observés avec les relevés terrain. Ces petites formes de dégradation se manifestent par une surface de roulement plus hétérogène. Ainsi, selon nous l'ajout du TRI dans le modèle permet justement de combler cette lacune puisqu'il indique s'il y a de fortes variations d'élévation au sein de la surface de roulement, sans pour autant positionner précisément leur emplacement comme le fait le TPI. Pour augmenter la capacité de prédiction du modèle, l'ajout du NDVI semble bien capturer l'effet du temps sur la dégradation d'un chemin.

2.5.3 Limites de l'étude

2.5.3.1 La résolution

Lors de la validation, le modèle de l'approche Terrain est ressorti plus performant que celui de l'approche Télédétection. Cette particularité n'est pas surprenante si l'échelle à laquelle les données ont été récoltées est considérée. Le premier modèle prédit la dégradation des chemins forestiers en utilisant un dispositif expérimental à fine résolution, c'est-à-dire par l'entremise de mesures précises aux centimètres. Inévitablement, les outils LiDAR à 1 m de résolution et Sentinel 2 à 10 m de résolution ne sont pas en mesure de rivaliser avec une telle précision. En effet, les chemins forestiers de l'est du Canada ont généralement une largeur variant entre 4 et 15 m, où les formes de dégradation font rarement plus de 1m². Le processus de dégradation à détecter se trouve donc dans un intervalle spatial limité qui est possiblement plus difficile à extraire à l'aide d'indices spatiaux qu'à l'aide des données mesurées *in situ*.

Néanmoins, la performance du modèle issu de l'approche Télédétection est jugée satisfaisante, puisque l'estimation de la dégradation des chemins forestiers à distance n'a pas pour but de fournir l'endroit exact de la dégradation (comme le fait l'approche Terrain), mais plutôt d'avoir une vue d'ensemble de l'état du chemin pour ensuite permettre une identification des tronçons qui nécessitent des interventions à court et à long terme. Ainsi, comme Vaze et al. (2010) l'ont souligné, la résolution à utiliser dans les analyses spatiales dépendrait de l'échelle des processus à expliquer. D'ailleurs, Sorensen et Seibert (2007) expliquent bien ce principe en utilisant le TWI comme exemple : « les écoulements des eaux de surface suivent généralement la topographie, il ne faut pas s'attendre à ce qu'ils suivent tous les petits détails à la surface du sol ». Certes, le fait d'utiliser une taille de cellule (1m et 10m) plus grossière que la dégradation observée diminue inévitablement la quantité de détails. Cependant, ceux-ci sont non essentiels pour obtenir une représentation générale à distance du processus étudié, soit la dégradation des chemins forestiers.

2.5.3.2 L'acquisition des données

Selon l'étude de Kiss et al. (2015) la différence entre les dates d'acquisition des données LiDAR et des observations (c.-à-d. 3 ans) est une limite de leur étude, car les conditions de la surface de roulement peuvent avoir changé pendant cet intervalle de temps. Cette limite pourrait s'appliquer à notre étude, car les données LiDAR proviennent d'un programme d'acquisition fixe dans le temps, où les MNT et MHC remontent aux étés 2017-2018, alors que les observations terrain datent de 2019. Toutefois, nous jugeons peu significatif l'impact réel de cette différence, puisque les courbes de prédictions temporelles de notre étude démontrent que la dégradation varie de moins de 5 % dans les cinq premières années, peu importe les simulations effectuées.

2.5.4 Implication future

Les modèles de prédiction de la dégradation proposés sont innovateurs et d'utilisation simple. Ils apportent ainsi de nouvelles connaissances sur l'état actuel et futur du réseau routier. À titre d'exemple, lors de l'échantillonnage en 2019, 21 % des 103,5 km de chemins inventoriés étaient dégradés à plus de 40 %. Les prédictions issues du modèle de l'approche Terrain supposent qu'il y aura 24 % de chemins qui auront une dégradation >40 % d'ici cinq ans si aucun entretien n'est apporté. Cette proportion s'élèvera à 31 % après 10 ans et 43 % après 20 ans sans entretien, soit le double de la proportion actuelle. Ainsi, les relations obtenues de cette étude peuvent dorénavant être intégrées dans la gestion du territoire forestier canadien. En combinant les connaissances spatio-temporelles fournies par les deux approches, il est notamment possible de planifier la fréquence de l'entretien des chemins forestiers, le budget rattaché et les secteurs les plus à risque pour l'accès au territoire (p. ex. fermeture imprévue d'un chemin), pour les usagers (p. ex. accident de la route) et pour les écosystèmes environnants (p. ex. augmentation de l'érosion).

De plus, il est primordial que les connaissances ressortant de cette étude soient prises en considération lors de l'implantation de nouveaux chemins. Annuellement, environ 0,24% de la superficie de la forêt canadienne est utilisée pour la construction de chemins forestiers (Statistique Canada, 2018). La croissance constante du réseau soulève de nombreuses questions face aux alternatives disponibles pour maintenir un accès au territoire forestier tout en réduisant les enjeux économiques, environnementaux et sociaux qui découlent de la construction des chemins. Ainsi, plusieurs pistes de solution ressortent de cette étude, notamment de procéder à la réfection du chemin au moment opportun, de procéder à un entretien régulier de la surface de roulement, des fossés et de l'emprise, de revoir les standards de construction et de limiter les chemins en secteurs abrupts.

Puis, jusqu'à maintenant, l'approche Télédétection permet d'estimer la dégradation sur des tronçons préalablement positionnés. Or, éventuellement une cartographie continue de la dégradation des chemins forestiers deviendrait une avenue qui offrirait une gestion en temps réel plus efficace des perturbations en milieu forestier. Par exemple, il serait alors possible de visualiser et déterminer l'état actuel de l'ensemble des chemins à emprunter lors des déplacements en forêt pour lutter contre les feux de forêt, pour effectuer la récolte du bois ou pour procéder au reboisement après perturbations.

2.6 Conclusion

L'objectif principal de cette étude était de pallier le manque de compréhension et de connaissances sur l'état des chemins forestiers de l'est du Canada. Les deux approches utilisées, soit les observations terrain et l'utilisation de la télédétection pour détecter la dégradation, fournissent de nouvelles connaissances temporelles et spatiales de la dégradation des chemins forestiers. Plus précisément, l'approche Terrain a permis de mieux comprendre et prédire (pseudo- R^2 0,43 et SMSE ± 8 %) comment se dégrade un chemin en fonction de la pente, du temps, de la largeur du chemin et de la perte de surface de roulement. L'approche Télédétection a démontré que l'utilisation de la topographie, la rugosité et la végétation combinées permet de prédire (pseudo- R^2 0,34 et SMSE ± 9 %) l'état actuel de la dégradation, témoignant donc du potentiel des outils à distance comme le LiDAR aéroporté et Sentinel 2.

La polyvalence de ces deux approches est un avantage de cette étude. En effet, les résultats obtenus sont exportables à l'ensemble du domaine de la forêt boréale de l'est du Canada, les données requises sont facilement accessibles et gratuites et plusieurs pistes de solutions pour améliorer la gestion forestière en ressortent. Assurément, l'intégration des autres facteurs influençant la dégradation et l'utilisation de nouveaux outils pour raffiner la résolution sont très prometteuses pour l'avancement des connaissances sur la dégradation des chemins en milieux forestiers.

Cette étude apporte un regard nouveau sur la gestion du réseau routier, permettant dorénavant de maintenir les retombées économiques, environnementales et sociales qu'offrent les chemins forestiers, tout en minimisant les enjeux rattachés à ces trois sphères de l'aménagement durable.

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude visait à pallier le manque de connaissance sur l'état actuel et futur des chemins forestiers par l'entremise de deux approches distinctes, soit à l'aide de relevé terrain et d'outils de télédétection. Pour ce faire, nous avons eu recours à un dispositif expérimental de 207 placettes d'échantillonnage afin de quantifier la superficie de la surface d'un chemin qui était dégradée. Cette approche Terrain nous a amené à mieux comprendre et prédire la dégradation d'un chemin en fonction de la pente, du temps, de la perte de surface de roulement et de la largeur du chemin. Les quatre prédicteurs jouent un rôle décisif sur le taux de dégradation d'un chemin forestier, où l'augmentation de la pente, du temps sans entretien et du pourcentage de perte de surface de roulement ont pour effet d'accentuer le taux de dégradation. Cette particularité est davantage notable sur les chemins de largeur étroite (4 à 7 m) et moyenne (>7 m à 9,5 m), qui affichent toujours une dégradation plus rapide que les chemins les plus larges (>9,5 m).

De son côté, l'approche Télédétection nous a permis d'extraire différents indices de topographie (TPI, TWI), de rugosité (TRI, CSI) et de végétation (NDVI, MHC) à l'aide des données LiDAR aéroporté et Sentinel 2. Le modèle de régression proposé pour cette approche intègre le pourcentage de dépression issu du TPI, la moyenne de TRI et la moyenne de NDVI. En d'autres mots, les prédictions de la dégradation requièrent l'utilisation d'un indice de topographie, de rugosité et de végétation, qui agissent en synergie pour estimer adéquatement la dégradation à l'échelle spatiale de la surface de roulement.

Ce projet diffère des autres études sur la dégradation des chemins forestiers puisqu'il s'attarde à quantifier l'effet des facteurs qui influencent la dégradation en fournissant

des courbes de prédictions concrètes pouvant être appliquées à l'ensemble du territoire boréal aménagé de l'est du Canada. De plus, l'utilisation des données à distance, soit des MNT et MHC du LiDAR et des images multispectrales Sentinel 2 a encore très peu été utilisé dans le contexte de dégradation en milieu forestier.

L'utilisation des deux approches proposées est très prometteuse pour un aménagement efficace et durable du réseau forestier. Néanmoins, d'autres paramètres sont à considérer dans l'étude de la dégradation des chemins forestiers, dont le flux de transport, le taux de compaction d'un chemin ou encore les matériaux utilisés pour construire la sous-fondation et la surface de roulement. De plus, d'autres outils pourraient être à considérer pour une détection plus fine de la dégradation à distance, dont la photogrammétrie et le LiDAR terrestre.

Cette étude a permis de fournir de nouvelles connaissances et une meilleure compréhension de la dégradation du réseau routier en milieu forestier. Les informations obtenues des deux approches apporteront inévitablement un regard nouveau sur la gestion du réseau routier forestier et de nouvelles pistes de solution afin de maintenir les retombées économiques, environnementales et sociales des chemins forestiers de l'est du Canada, tout en minimisant au maximum les enjeux rattachés à ces trois sphères de l'aménagement durable.

ANNEXE A

Tableau .1 Tuiles Sentinel 2 téléchargées à 10 m de résolution. L'ensemble des tuiles proviennent du satellite A avec une couverture nuageuse <10 %.

Tuiles	Date d'acquisition
Secteur 1	
T18UXU	2019-08-24
T18UWV	2019-08-24
T18UXV	2019-07-15
Secteur 2	
T18TWT	2019-08-24
T18TXT	2019-08-24
Secteur 3	
T18UVU	2019-07-31
T18UUU	2019-07-18

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- Aalto, J., Le Roux, P.C. et Luoto, M. (2013). Vegetation mediates soil temperature and moisture in arctic-alpine environments. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 45(4), 429-439. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.4.429>
- Aber, James S., Marzolff, Irene, Ries, Johannes B. et Aber, Susan E. W. (2019). Chapter 3—Principles of Photogrammetry. Dans J.S. Aber, I. Marzolff, J.B. Ries et S.E.W. Aber (dir.), *Small-Format Aerial Photography and UAS Imagery – Second Edition* (2^e éd., p. 19-38). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812942-5.00003-3>
- Abulizi, N., Kawamura, A., Tomiyama, K. et Fujita, S. (2016). Measuring and evaluating of road roughness conditions with a compact road profiler and ArcGIS. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5), 398-411. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.004>
- Adlinge, S. S. et Gupta, A.K. (2013). Pavement deterioration and its causes. *International Journal of Innovative Research and Development*, 2(4), 437-450.
- Akgul, M., Yurtseven, H., Akburak, S., Demir, M., Cigizoglu, H.K., Ozturk, T., et al. (2017). Short term monitoring of forest road pavement degradation using terrestrial laser scanning. *Measurement*, 103, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.045>
- Akgul, M., Akburak, S., Yurtseven, H., Akay, A.O., Cigizoglu, H.K., Demir, M. et al. (2019). Potential impacts of weather and traffic conditions on road surface performance in terms of forest operations continuity. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 2533-2550. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_25332550
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., et al. (2011). "Ecohydrological advances and applications in plant—water relations research: a review", *Journal of Plant Ecology*, 4,1-2, 3-22.
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G.R., Alvarado-Barrientos, M.S., Rebel, K., Van Osch, F.P., Rietkerk, M. et al. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant—water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr005>

- Azizi, Z., Najafi, A. et Sadeghian, S. (2014). Forest Road Detection Using LiDAR Data. *Journal of Forestry Research*, 25(4), 975-980. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0544-0>
- Balijepalli, C. et Oppong, O. (2014). Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. *Journal of Transport Geography*, 39, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.025>
- Bartoń, K. (2020). Package 'MuMIn'. Repéré à <https://cran.r-project.org/web/packages/MuMIn/MuMIn.pdf>
- Beven, K.J. et Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24,(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bianchini Ciampoli, L., Tosti, F., Economou, N. et Benedetto, F. (2019). Signal processing of GPR data for road surveys. *Geosciences*, 9(2), 96. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020096>
- Blouin, J., Berger, J.-P., Landry, Y. et Saucier, J.-P. (2008). *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 5 b - Coteaux du réservoir Gouin, 5c - Collines du haut Saint-Maurice et 5 d - Collines ceinturant le lac Saint-Jean* (2^e éd.) [PDF]. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Forêt-Québec, Direction des inventaires forestiers. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-5bcd.pdf>
- Bourgeois, L., Kneeshaw, D. et Boisseau, G. (2005). Les routes forestières au Québec : Les impacts environnementaux, sociaux et économiques. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 6(2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.4352>
- Caliskan, E. (2013). Environmental impacts of forest road construction on mountainous terrain. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 23. DOI [10.1186/1735-2746-10-23](https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-23)
- Conseil Canadien des Ministres des Forêts. (2020). National Forestry Database. Repéré à <http://nfdp.ccfm.org/en/index.php>
- Ciobanu, V., Alexandru, V. et Săceanu, S. C. (2012). Degradation forms of forest gravel road roadways under heavy vehicles used in timber transport. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 5(1), 37-42.

- Clode, S., Kootsookos, P.J. et Rottensteiner, F. (2004). The automatic extraction of roads from LIDAR data. *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 35, 231-236.
- Cribari-Neto, F. et Zeileis, A. (2009). Beta regression in R. Repéré à <https://cran.r-project.org/web/packages/betareg/vignettes/betareg.pdf>
- Dallaire, N. (2013). *Cadre de référence et démarche de priorisation du réseau des chemins multiusages en Abitibi-Témiscamingue* [PDF]. Communications présentées à la Conférence Régional des élus de l'Abitibi-Témiscamingue. Repéré à http://www.conferenceregionale.ca/documents/files/rapport_cadre_reference_demarche_priorisation_reseau_chemins_multiusages_region_mars2013.pdf
- Desautels, R., Després, R., Dufresne, F., Gilbert, G., Leblanc, S., Méthot, L. et al. (2009). Voirie forestière. Dans R. Doucet et M. Côté (dir.), *Manuel de foresterie* (2^e éd., p. 1187-1244), Québec : Éditions MultiMondes.
- De Witt, A., Boston, K. et Leshchinsky, B. (2020). Predicting Aggregate Degradation in Forest Roads in Northwest Oregon. *Forests*, 11(7), 729. <https://doi.org/10.3390/f11070729>
- Dittmer, M. et Johnson, A.A. (1975). *Impacts of high-intensity rainstorms on low-volume roads and adjacent land* [Forests]. Communications présentées au Workshop on Low-volume Roads, Boise, Idaho (USA), 16-19.
- Dobiaš, J. (2005). Forest road erosion. *Journal of forest science*, 51(1), 37-46. <https://doi.org/10.17221/4542-JFS>
- Fahrig, L. et Rytwinski, T. (2009). Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. *Ecology and society*, 14(1).
- Fannin, R. J. et Lorbach, J. (2007). *Guide to forest road engineering in mountainous terrain* (2^e éd.). Rome, Italie : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Ferrari, S. et Cribari-Neto, F.(2004). Beta regression for modelling rates and proportions. *Journal of applied statistics*, 31(7), 799-815. <https://doi.org/10.1080/0266476042000214501>
- Ferraz, A., Mallet, C. et Chehata, N. (2016). Large-scale road detection in forested mountainous areas using airborne topographic lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 112, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.002>

- Forest Management Branch. (2015). *Forest Resources Act Standards and Guidelines: Forest Resources Roads*. Whitehorse, Yukon: Gouvernement du Yukon. Repéré à <http://www.forestry.gov.yk.ca/>
- Forest Practices Board. (2015). *Access Management and Resource Roads: 2015 Update*. Gouvernement de la Colombie-Britannique. Repéré à <https://www.bcfpb.ca/reports-publications/reports/access-management-and-resource-roads-2015-update/>
- Forslöf, L. et Jones, H. (2015). Roadroid: Continuous road condition monitoring with smart phones. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(4), 485-496. DOI [10.17265/1934-7359/2015.04.012](https://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.04.012)
- Gosselin, J. (2002). *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 4b – Coteaux du réservoir Cabonga et 4c – Collines du Moyen-Saint-Maurice* [PDF]. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-4bc.pdf>
- Gouvernement de la Colombie-Britannique. (s.d.). Resource Roads. Repéré à <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/industry/natural-resource-use/resource-roads>
- Gouvernement de l'Alberta (2016). Alberta timber harvest planning and operating ground rules framework for renewal [PDF]. Repéré à <https://open.alberta.ca/dataset/9b063439-285b-4d38-b979-e3ae59c80d23/resource/28365bb7-9369-4f5a-8695-655a6ef0f6b3/download/2016-12-alberta-timber-harvest-planning-and-operating-groundrules-framework.pdf>
- Gucinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R., Brookes, M.H. (2001). *Forest roads: a synthesis of scientific information* (Rapport n° PNW-GTR-509). Portland, Oregon: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Repéré à <https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/gtr509.pdf>
- Guo, J., Tsai, M.-J. et Han, J.-Y. (2015). Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar. *Automation in Construction*, 58, 165-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.017>
- Heidari, M. J., Najafi, A. et Alavi, S. (2018). Pavement Deterioration Modeling for Forest Roads Based on Logistic Regression and Artificial Neural Networks. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 39(2), 271-287.

- Herold, M., Roberts, D., Smadi, O. et Noronha, V. (2004). Road condition mapping with hyperspectral remote sensing. Dans R.O. Green (dir.), *Proceedings of the 13th JPL Airborne Earth Science Workshop* (n° 05-3, p. 129-142). Pasadena, Californie : Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H. et Samberg, A. (2000, juin). *Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment*. Communications présentées au Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR (n° 1, p. 139-147).
- Jetté, J.-P., Robitaille, A., Pâquet, J. et Parent, G. (1998). *Guide des saines pratiques forestières dans les pentes du Québec* [PDF]. Charlesbourg, Québec : Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec. Repéré à https://conseilaunordgaspesie.ca/public/documents/bonnes_pratiques/foresterie/RN983036.pdf
- Kaakkurivaara, T., Vuorimies, N., Kolisoja, P. et Uusitalo, J. (2015). Applicability of portable tools in assessing the bearing capacity of forest roads. *Silva Fennica*, 49(2), 1-26. <https://doi.org/10.14214/sf.1239>
- Karila, K., Matikainen, L., Puttonen, E. et Hyypä, J. (2017). Feasibility of Multispectral Airborne Laser Scanning Data for Road Mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(3), 294-298. DOI [10.1109/LGRS.2016.2631261](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2631261)
- Karim, F.M.A., Rubasi, K.A.H. et Saleh, A.A. (2016). The road pavement condition index (PCI) evaluation and maintenance: a case study of Yemen. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, 8(1), 1446-1455. <https://doi.org/10.1515/otmcj-2016-0008>
- Kiss, K., Malinen, J. et Tokola, T. (2015). Forest road quality control using ALS data. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(11), 1636-1642. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0067>
- Kiss, K., Malinen, J. et Tokola, T. (2016). Comparison of high and low density airborne lidar data for forest road quality assessment. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3(8), 167-172. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-8-167-2016>
- Latrémouille, I. (2012). *Guide des saines pratiques d'entretien des chemins forestiers dans les zecs*. Repéré à <https://www.reseazec.com/publications/gestion-integree-des-ressources?page=2>
- Leboeuf, M. (2016). *Arbres et plantes forestières du Québec et des maritimes* (2^e éd.). Waterloo, Québec : Édition Michel Quintin.

- Loprencipe, G. et Pantuso, A. (2017). A specified procedure for distress identification and assessment for urban road surfaces based on PCI. *Coatings*, 7(5), 65. <https://doi.org/10.3390/coatings7050065>
- Luce, C.H. et Wemple, B.C. (2001). Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic effects of forest roads. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(2), 111-113.
- Manitoba Conservation and Water Stewardship. (2012). *Forest Practices Guidebook: Forestry Road Management*. Winnipeg, Manitoba: Gouvernement du Manitoba. Repéré à https://www.gov.mb.ca/sd/forestry/pdf/practices/forestry_road_mgmt_2012.pdf
- Matinnia, B., Parsakhoo, A., Mohammadi, J. et Jouibari Shaban, S. (2017). Monitoring geometric properties of an existing forest road using airborne Lidar data. *Journal of Forest Science*, 63 (11), 490-495. <https://doi.org/10.17221/95/2017-JFS>
- McFadden, D. (1977). *Quantitative methods for analyzing travel behavior of individuals: some recent developments*. Berkeley, Californie : Institute of Transportation Studies, University of California. Repéré à <https://core.ac.uk/download/pdf/6448852.pdf>
- McFarlane, H.W., Paterson, W.G. et Dohaney, W.J. (1975). Experience with the Benkelman beam on Canadian forest roads. Dans W. N. Carey Jr., (dir.), *Low-Volume roads* (rapport n° 160, p. 210-217). Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences. Repéré à <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr160/160.pdf>
- Meneses-Tovar, C.L. (2011). NDVI as indicator of degradation. *Unasylva*, 238(62), 39-46.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. (s.d.). *Guide d'application du Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'état*. Québec, Canada : Gouvernement du Québec. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/RADF/guide/>
- Můčka, Peter (2016). "Current approaches to quantify the longitudinal road roughness", *International Journal of Pavement Engineering*, 17,8, 659-679.
- Můčka, P. (2016). Current approaches to quantify the longitudinal road roughness. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(8), 659-679. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1011782>

- O'mahony, M. J., Ueberschaer, A., Owende, P. M. O. et Ward, S. M. (2000). Bearing capacity of forest access roads built on peat soils. *Journal of terramechanics*, 37(3), 127-138. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(00\)00003-3](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(00)00003-3)
- Paradis-Lacombe, P. (2018). *Caractérisation de l'état et de la durabilité des traverses de cours d'eau sur les chemins forestiers* (Mémoire de maîtrise). Université Laval. Repéré à <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/29862/1/34202.pdf>
- Paterson, W. (1986). International roughness index: Relationship to other measures of roughness and riding quality. *Transportation Research Record*, (1084), 49-59.
- Paterson, W.G., Mcfarlane, H.W. et Dohaney, W.J. (1975). Forest road classification in eastern Canada. Dans W. N. Carey Jr., (dir.), *Low-Volume roads* (rapport n° 160, p. 288-295). Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences. Repéré à <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr160/160.pdf>
- Prasad, J. R., Kanuganti, S., Bhanegaonkar, P. N., Sarkar, A. K. et Arkatkar, S. (2013). Development of relationship between roughness (IRI) and visible surface distresses: A study on PMGSY roads. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 104, 322-331. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.125>
- R Development Core Team. (2011). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Repéré à <http://www.R-project.org/>
- Riley, S.J., DeGloria, S.D. et Elliot, R. (1999). Index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of sciences*, 5(1-4), 23-27.
- Różycka, M., Migoń, P. et Michniewicz, A. (2017). Topographic Wetness Index and Terrain Ruggedness Index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland. *Zeitschrift für geomorphologie, Supplementary issues*, 61(2), 61-80. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/0328
- Ryan, T., Phillips, H., Ramsay, J. et Dempsey, J. (2004). *Forest Road Manual: Guidelines for the design, construction and management of forest roads*. Dublin, Irlande: COFORD, National Council for Forest Research and Development. Repéré à <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/ForestRoadManual.pdf>
- Salvi, R., Ramdasi, A., Kolekar, Y. A. et Bhandarkar, L.V. (2019). Use of Ground-Penetrating Radar (GPR) as an Effective Tool in Assessing Pavements—A

- Review. Dans R. Sundaram, Shahu, J.T. et V. Havanagi (dir.), *Geotechnics for Transportation Infrastructure : Recent Developments, Upcoming Technologies and New Concepts* (vol. 2, p. 85-95). Singapor: Springer Nature Singapor Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7>
- Sayers, M. W. (1995). On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record*, (1501), 1-12.
- Setyawan, A., Nainggolan, J. et Budiarto, A. (2015). Predicting the Remaining Service Life of Road Using Pavement Condition Index. *Procedia Engineering*, 125, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.108>
- Shahin, M.Y. et Walther, J.A. (1990). *Pavement maintenance management for roads and streets using the PAVER system* (rapport n° USACERL TR M-90/05). US Army Corps of Engineers Construction—Engineering Research Laboratory. Repéré à <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a227464.pdf>
- Smithson, M. et Verkuilen, J. (2006). A better lemon squeezer? Maximum-likelihood regression with beta-distributed dependent variables. *Psychological methods*, 11(1), 54-71. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.11.1.54>
- Sørensen, R. et Seibert, J. (2007). Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.001>
- Sörensen, R., Zinko, U. et Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 101-112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Statistique Canada. (2018). Human Activity and the Environment: Forests in Canada (Catalogue n° 16-201-X). Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/pub/16-201-x/16-201-x2018001-eng.pdf?st=Z5VEyMQz>
- Statistique Canada. (2020). Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, par industries (x 1 000 000) - Tableau 36-10-0401-01. <https://doi.org/10.25318/361004010101-fra>
- Symonds, M.R.E. et Moussalli, A. (2011). A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65(1), 13-21. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1037-6>

- Tarpley, J.D., Schneider, S.R. et Money, R.L. (1984). Global Vegetation Indices from the NOAA-7 Meteorological Satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(3), 491-494. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0491 : GVIFTN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0491 : GVIFTN>2.0.CO;2)
- Thompson, M. R. (1975). Soil-lime mixtures for construction of fine-grained soil pavements. Dans W. N. Carey Jr., (dir.), *Low-Volume roads* (rapport n°160, p. 149-165). Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences. Repéré à <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr160/160.pdf>
- Uchida, T., Xue, J., Hayasaka, D., Arase, T., Haller, W.T. et Gettys, L.A. (2014). The relation between road crack vegetation and plant biodiversity in urban landscape. *International Journal of Geomate*, 6(2), 885-891. DOI [10.21660/2014.12.3177](https://doi.org/10.21660/2014.12.3177)
- Vaze, J., Teng, J. et Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(10), 1086-1098. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.014>
- Veneziano, D., Souleyrette, R. et Hallmark, S. (2002). *Evaluation of LiDAR for highway planning, location and design*. Communications présentées à Conference Proceedings of Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale. ISPRS Commission I. Mid-Term Symposium in conjunction with Pecora. Repéré à <https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part1/paper/00029.pdf>
- Walther, B. A. et Moore, J. L. (2005). The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. *Ecography*, 28(6), 815-829. <https://doi.org/10.1111/j.2005.0906-7590.04112.x>
- Weiss, A. D. (2001). *Topographic positions and landforms analysis*. Affiche présentée à ESRI International User Conference, San Diego, California. Repéré à http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC_18x22.pdf
- Zeileis, A., Cribari-Neto, F., Gruen, B., Kosmidis, I., Simas, A. B. et Rocha, A.V. (2020). Package 'betareg'. Repéré à <https://cran.r-project.org/web/packages/betareg/betareg.pdf>
- Zhang, C. (2008). An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 627-632.