

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

MODÉLISATION DE LA VULNÉRABILITÉ ET DE LA DÉTÉRIORATION DES
ROUTES FORESTIÈRES : CAS DU TÉMISCAMINGUE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉCOLOGIE

PAR
RIHAB SAADOUNI

DÉCEMBRE 2019

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier profondément mon directeur de recherche Osvaldo Valeria, ainsi que mon codirecteur Marc Mazerolle; pour avoir cru en moi dès notre première rencontre. Je suis reconnaissante pour leurs conseils pertinents, leur support ainsi que leur suivi tout le long de ce projet. Un grand merci à David Martin qui m'a aidé dans les mesures de terrain pendant deux mois.

Mes remerciements s'adressent également à RYAM GESTION FORESTIÈRE qui a contribué au financement de la présente étude, plus particulièrement à Loydy Brousseau et Jocelyn Roy pour leur aide pendant les sorties sur le terrain. J'exprime ma gratitude à tous les membres de la Chaire-AFD rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions. Je n'oublie pas Danièle Laporte et Marie-Hélène Longpré pour leur sympathie et leur générosité. Enfin, un merci spécial surtout à mes parents ainsi qu'à toute ma famille et à tous mes proches et mes amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

AVANT-PROPOS

Le mémoire est divisé en deux principaux chapitres, suivi d'une conclusion générale et une annexe. Le chapitre 1 présente d'abord une introduction générale, incluant l'état des connaissances. Le chapitre 2 contient l'essentiel de la recherche qui a permis d'évaluer la vulnérabilité et la détérioration des routes forestières. Une conclusion générale est présentée par la suite. L'annexe A présente une carte des flux de transport de bois pour la région du Témiscamingue.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
RÉSUMÉ	xi
CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Problématique	1
1.2 État des connaissances.....	3
1.2.1 Vulnérabilité des routes forestières	3
1.2.2 La détérioration des routes forestières	5
1.3 Objectifs et hypothèses	7
1.3.1 Objectif général	7
1.3.2 Objectifs spécifiques	7
1.3.3 Hypothèses	7
CHAPITRE II VULNÉRABILITÉ ET DÉTÉRIORATION DES ROUTES FORESTIÈRES.....	9
2.1 Résumé	10
2.2 Introduction.....	11
2.3 Méthodes.....	12
2.3.1 Aire d'étude.....	12

2.3.2	Vulnérabilité des routes forestières	13
2.3.3	La détérioration des routes forestières	17
2.4	Résultats.....	23
2.4.1	Flux de transport de bois	23
2.4.2	Vulnérabilité liée à l'interruption de flux de transport de bois	25
2.4.3	Modélisation de la détérioration des routes forestières	30
2.5	Discussion.....	34
2.5.1	Flux et vulnérabilité des routes forestières.....	34
2.5.2	Détérioration des routes forestières.....	40
2.6	Conclusion	43
CHAPITRE III CONCLUSION GÉNÉRALE		43
ANNEXE A SIMULATION DU FLUX DE TRANSPORT DE BOIS EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE SELON LES QUATRE PREMIERS INVENTAIRES ÉCOFORESTIERS.....		47
BIBLIOGRAPHIE		48

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Illustration de calcul de la demande de voyages pour un secteur de récolte par période (méthode Shreve)	14
2.2	Modélisation de l'interruption de flux de transport de bois.....	15
2.3	Dispositif expérimental à partir duquel les facteurs pouvant expliquer la détérioration des routes ont été mesurés.....	19
2.4	Carte de flux de transport de bois simulé (nombre de voyages total pour l'ensemble de la période d'analyse) pour l'UA 81-51, les traits les plus épais localisés entre l'usine (Gris) et les secteurs de coupe (Verts) représentent les flux les plus importants.....	24
2.5	Vulnérabilité des routes avec liens alternatifs UA 81-51, cumulée pendant la période d'analyse (40 ans), superposée au flux de transports de bois (voir Figure 2.4), exprimée en nombre de kilomètres additionnels parcourus et proportionnels au chemin le plus court multiplié par le nombre de transports de bois débloqués lors d'une interruption pour atteindre l'usine par les liens alternatifs (km - nombre de voyages débloqués)	26
2.6	Vulnérabilité des routes sans liens alternatifs UA 81-51, cumulée pendant la période d'analyse (40 ans), exprimée en nombre de voyages en blocage total et superposée aux flux de transport de bois (voir Figure 2.4)	28

2.7	Vulnérabilité générée par le blocage des routes forestières sans liens alternatifs (nombre de voyages bloqués) selon la classe de la route.....	29
2.8	Vulnérabilité générée par le blocage des routes forestières avec liens alternatifs (km - nombre de voyages débloqués) selon la classe de route	30
2.9	Distribution de la variable âge (année) des données acquises pour mesurer l'état de la route.....	31
2.10	Distribution de la variable pente (degré) des données acquises pour mesurer l'état de la route	32
2.11	Distribution du pourcentage de perte en surface de roulement (PPSR) selon la classe fonctionnelle.....	33
2.12	Courbes de la détérioration des routes forestières selon le PPSR en fonction de la classe fonctionnelle et au cours du temps (années) obtenues à partir du modèle mixte	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Description des niveaux de la détérioration pour la variable autre forme de détérioration	21
2.2	Variables explicatives exploitées pour déterminer leur effet sur la détérioration des routes	22
2.3	Structure du réseau routier (description de classe) de flux simulé et emprunté par le transport de bois dans l'UA 81-51.....	25
2.4	Structure du réseau routier (description de classe) localisé dans les cellules d'une vulnérabilité $\geq 20\ 000$ (km - nombre de voyages débloqués) dans l'UA 81-51 et engendrée principalement par le blocage des routes ayant des alternatives.....	27
2.5	Estimation des différents effets fixes qui expliquent la détérioration de la route.....	33
2.6	Connectivité des itinéraires sous Routard	39

RÉSUMÉ

Les routes forestières permettent l'accès aux ressources naturelles du Québec méridional et constituent un élément clé pour l'économie. Ce réseau routier est très dense dans certaines régions et certains tronçons sont abandonnés depuis longtemps. Ceci a entraîné une détérioration des routes rendant des portions de territoire inaccessibles. Cette détérioration comporte des impacts négatifs sur le plan écologique, économique et social. De plus, le seul outil disponible qui caractérise le réseau routier est constitué d'une base de données « Routard » construite à partir de différentes sources et qui renvoie à une classification incohérente à la réalité du terrain. Devant le vieillissement du réseau routier forestier et en absence d'un système d'analyse de l'état d'usure des routes, le développement d'un outil permettant de prioriser leur entretien est nécessaire. Cette étude vise à simuler la vulnérabilité des routes liée à l'interruption du flux de transport de bois et à modéliser la détérioration des routes forestières à partir de données récoltées sur le terrain. Nous avons réalisé nos travaux dans les Unités d'Aménagement (UA 81-52 et 8151) de la MRC de Témiscamingue.

Une approche d'analyse en deux étapes a été déployée. Pour la première étape, la vulnérabilité des routes forestières a été estimée via une analyse spatiale basée sur le concept de l'interruption du flux de transport de bois par un événement perturbateur. La deuxième étape visait à modéliser la détérioration des routes forestières via un dispositif expérimental pour mesurer les différentes formes de détérioration suivant trois classes fonctionnelles de route (classe primaire, classe secondaire et classe tertiaire), deux types de dépôt de surface (milieux humides ou secs) et quatre périodes de temps de leurs constructions (selon les quatre inventaires forestiers décennaux).

Les résultats de l'analyse de vulnérabilité montrent que les portions du réseau routier proches de l'usine de transformation de bois (chemins de pénétration pour accéder aux ressources forestières) sont sensibles lors d'une interruption des routes avec lien alternatif comparativement à celles plus en amont de la destination qui sont sensibles lors d'une interruption des routes sans lien alternatif. Cette sensibilité est due généralement aux flux de transport de bois et de la disponibilité des routes alternatives.

Les courbes de détérioration temporelles que nous avons construites à partir des données récoltées sur le terrain montrent que les routes de classes fonctionnelles supérieures (critères de construction et coûts élevés) se détériorent plus lentement que celles des classes inférieures (critères de construction et coûts moins élevés).

La détérioration était expliquée principalement par le pourcentage de perte en surface de roulement (PPSR) qui a été influencé par la pente et l'interaction entre l'âge de la route et sa classe fonctionnelle.

Ce projet contribue à intégrer le niveau de détérioration puis la vulnérabilité du réseau sur un territoire et permettrait de développer un système de gestion et de planification de l'entretien plus efficace.

Mots clés : accès aux ressources, analyse spatiale, détérioration, flux de transport, routes forestières, vulnérabilité.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Problématique

L'étendue forestière du Québec atteint les 761 100 km² (Salmon, 2016). L'accès aux différents compartiments de cet immense territoire forestier présente un défi pour l'aménagement forestier (Murray, 1998). Les routes forestières sont essentielles à l'accès au territoire forestier, car elles permettent la réalisation des activités sylvicoles, la récolte du bois et le transport du matériel et du personnel (Spaeth, 1998). La rentabilité des opérations sylvicoles est très influencée par les coûts de construction la route (Arima et al., 2005; Kirby et al., 1986) et le transport de bois (Bjorndal et al., 2012). Les routes forestières ouvrent également l'accès au territoire pour d'autres utilisations, comme la protection contre le feu, la villégiature et la pratique des activités comme la chasse et la pêche (Weintraub et al., 2000). Les routes forestières sont planifiées et construites conformément aux objectifs et aux exigences légales qui visent la sécurité des utilisateurs (Abeli et al., 2000), l'impact sur l'environnement (Cornish, 2001) et la protection de la forêt suite aux perturbations naturelles (Bourgeois et al., 2005). En Abitibi-Témiscamingue, les routes forestières sont un élément clef de la chaîne d'approvisionnement. Par conséquent, l'évaluation de l'état des routes et l'estimation de risque de rupture d'accès au territoire forestier et les aléas du mouvement de stock de bois qui en découlent se révèlent nécessaires.

Il est primordial d'évaluer la vulnérabilité des routes forestières liée à l'interruption du flux du transport de bois par un évènement perturbateur aléatoire comme une inondation, un accident majeur ou un bris de pont (Latorae et Marchiori, 2005). En effet, l'étendue spatiale et la durée de la perturbation ainsi que l'existence des routes alternatives déterminent l'impact de rupture de la route forestière sur le transport forestier (majeur, moyen, faible) (Jenelius et Mattsson, 2015). La rupture des routes forestières peut découler directement de leur détérioration. Des sections des routes forestières se détériorent dans le temps suite à des facteurs de site (ex. type de sol, pente, drainage) (Coulter et al., 2006a), des facteurs techniques (ex. largeur, longueur, remblai, type de surface de roulement, niveau d'usure) et le temps depuis la construction et l'entretien du réseau (Martin et al., 2001).

Au Québec, les données liées aux routes forestières sont sauvegardées dans la base de données Routard qui regroupe des informations disperses. Toutefois, le résultat du regroupement renvoie à une classification qui semble incohérente, au niveau des usages, de la fréquence et du type de structure (Dallaire, 2013). Devant le vieillissement du réseau forestier et l'absence d'un système d'analyse commun qui permet de qualifier l'état de l'usure de ces routes afin de prioriser l'entretien des chemins forestiers (Potočnik et al., 2005), des efforts doivent être déployés.

Pour combler ces lacunes, cette étude se base sur la performance des systèmes d'information géographique qui offrent d'énormes possibilités dans la manipulation de grandes quantités d'information de sources diverses (Alexakis et al., 2014) afin de résoudre les problèmes de la gestion forestière (Dean, 1997), tant sur le plan de la planification que sur le plan d'optimisation (Gumus, 2009).

1.2 État des connaissances

1.2.1 Vulnérabilité des routes forestières

Les perturbations qui engendrent la fermeture courte ou prolongée d'une route peuvent être causées par des événements, dont certains proviennent de l'intérieur du système de transport (accidents, défaillances techniques) et d'autres de l'extérieur du système, souvent causés par la nature (inondation, feu de forêt, séisme) (Jenelius et Mattsson, 2015; Berdica, 2002). Il est donc important d'évaluer la vulnérabilité des routes forestières face à ces perturbations. Plusieurs auteurs proposent des définitions plus ou moins similaires pour la vulnérabilité d'un système (Luathep et al. 2011; Erath et al. 2009; Knoop et al. 2008). Jenelius et Mattsson (2008) qualifient la vulnérabilité des routes comme le risque sociétal de sa rupture. L'idée derrière le concept est d'étudier et de comparer la situation des différents individus en fonction des variables socio-économiques, démographiques et géographiques d'intérêt (quantité de bois transportée, destination). Cette dernière définition est proche de celle de Holmgren (2006) qui définit la vulnérabilité comme étant l'ensemble des propriétés d'un système qui pourraient affaiblir ou limiter sa capacité à maintenir son fonctionnement, lorsqu'il est exposé aux dangers.

Dans la littérature, les indices de la vulnérabilité se regroupent selon deux approches : celle de la distance de voyage et celle du temps de voyage. Lors d'une rupture de la route, la distance de voyage se manifeste quand le conducteur doit trouver une route alternative et qu'il sera amené à parcourir des distances plus longues. Nous citons comme premier exemple l'indice d'accessibilité de Hansen mesurant la relation entre le taux de développement résidentiel et l'accès au lieu de travail et aux commerces (Taylor et al., 2007). Un deuxième exemple est la mesure d'efficacité avec laquelle le réseau échange des informations localement et globalement (Latora et Marchiori, 2001).

La deuxième approche qui est le temps de voyage correspond au temps ajouté pour arriver à destination incluant le temps d'attente lors de la rupture de la route. L'indice de la robustesse du réseau (Scott et al., 2006) est un exemple qui prend en compte la capacité des liens routiers, les flux de réseau et sa topologie. Balijepalli et Oppong (2014) présentent une mesure de la vulnérabilité qui tient compte de la classification fonctionnelle des routes pour élaborer des plans alternatifs. Dans un réseau dense, les conducteurs suivent généralement des itinéraires plus rapides même s'ils sont plus longs en termes de distance.

Les deux approches (temps et distance de voyage) ont été adaptées dans l'étude de Jenelius et Mattsson (2008) qui ont évalué la vulnérabilité à partir de composantes spatiales et temporelles de l'événement perturbateur et selon deux angles : l'angle de l'importance du lien routier et l'angle de l'exposition de l'utilisateur à un scénario de perturbation. L'importance du lien routier est d'identifier les liens routiers qui seront plus sévèrement touchés par une perturbation que d'autres. Lors d'une perturbation, un lien routier est plus important qu'un autre lorsque la somme d'augmentation du temps de voyage de l'ensemble des utilisateurs est plus importante. L'augmentation du temps de voyage comporte le temps d'attente jusqu'à ouverture de la route ainsi que la différence de temps de déplacement entre la nouvelle route et la route originale (normalement la plus courte), dans le cas où la route alternative existerait. Les routes alternatives réduisent le temps d'attente des utilisateurs de la route fermée lors d'une perturbation en modifiant l'itinéraire et sans changer la destination (Jenelius et Mattsson, 2008). En effet, l'importance du lien routier dépend de la demande de voyage et de l'interconnectivité du lien routier qui permet le recours à des routes alternatives. Dans le pire cas où le lien routier le plus important est fermé, l'exposition de l'utilisateur est mesurée comme l'augmentation moyenne du temps de voyage par utilisateur (Jenelius et Mattsson, 2015). Ces derniers auteurs ont mesuré la vulnérabilité de la route urbaine par la simulation d'une interruption du lien routier. Dans un premier temps, ils ont localisé les routes en

superposant des grilles de taille variable sur le réseau étudié. Dans un second temps, ils ont bloqué à chaque déplacement une cellule de la grille pour générer l'évènement perturbateur qui interrompra le flux de transports. Ce concept de simulation de l'interruption du lien routier est un outil simple qui pourrait servir de base d'analyse de la vulnérabilité du réseau forestier.

1.2.2 La détérioration des routes forestières

La détérioration correspond à la dégradation de l'état des routes forestières dans le temps et sous l'effet de plusieurs facteurs (Demir, 2007), particulièrement et en premier lieu les facteurs de site notamment le type de sol (Duncan, 1987), la pente et les variations météorologiques climatiques (cycle de gel-dégel) (Gumus 2009; Martin et al., 2001). En second lieu, les facteurs techniques comme le drainage (évacuation des eaux de ruissellement, drainage de la structure granulaire et les eaux souterraines), l'épaisseur du revêtement (épaisseur surface de roulement) influencent l'état des routes (Brodeur et al., 2002). Finalement, la date de construction et d'entretien des routes est essentielle pour définir la durée de vie des matériaux (Martin et al., 2001). En effet, une route fraîchement entretenue ou construite est visiblement plus robuste qu'une route abandonnée ou anciennement construite. La détérioration peut être sous plusieurs formes :

- Planche à laver : ondulations à intervalles réguliers et perpendiculaires à l'axe de la route, causée par la répétition au même endroit de freinage brusque ou d'accélération (Latrémoille, 2012).
- Nid de poule : cavité causée par une compaction irrégulière des matériaux ou un mauvais profilage du chemin (Latrémoille, 2012).
- Ornière : dépression linéaire parallèle au chemin causé par la circulation de véhicules plus lourds que la capacité portante du chemin (Latrémoille, 2012).

- Les inondations des routes et l'obstruction des ponceaux : colmatage des ponceaux par les débris, le niveau d'eau augmentera à l'amont de l'ouvrage et le chemin pourrait être sérieusement endommagé par des inondations (Akay et al., 2008).
- Érosion : les particules du sol sont décompactées et transportées de la route vers le système de drainage et les cours d'eau (Heidari, 2016). Les routes forestières localisées en amont d'une pente, en bas de la pente et sur un plateau se comportent différemment en matière d'érosion et elles sont influencées par la saison ainsi que la présence de la végétation ou non. En effet, au début de l'hiver, avec le cycle du gel et du dégel et sans la présence d'herbes, la route en haut de la pente est plus exposée à l'érosion et les sédiments générés s'accumulent en bas de la pente (Swift, 1988).

Un protocole du Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec (Brodeur et al., 2002) propose une série de mesures et d'observations qui permettent le diagnostic des causes liées à la détérioration apparente de la chaussée pour prendre les mesures d'entretien adéquates. Ce protocole consiste à décrire la détérioration, les causes probables, le niveau de sévérité et la mesure de l'étendue. Les différents entretiens qui peuvent être effectués pour les routes forestières (Latrémouille, 2012) sont :

- Le nivelage pour enlever les imperfections dans la surface de roulement et pour ramener sur le chemin le matériel poussé sur les côtés.
- Résolution de problèmes comme planche à laver, nid de poule ou ornière;
- Nivelage au niveau des traverses de cours d'eau : les approches des ponts nécessitent un entretien fréquent.
- Entretien des ponceaux et structure de drainage : enlever les obstacles qui nuisent à l'écoulement de l'eau.

- Contrôle de la poussière : la poussière dégagée par le passage des véhicules parfois exige l'utilisation d'abat-poussière.
- Contrôle de la végétation : la végétation peut nuire à l'écoulement de l'eau dans les fossés et dans les ponceaux et, surtout, peut nuire à la sécurité des conducteurs en diminuant la visibilité des conducteurs.

1.3 Objectifs et hypothèses

1.3.2 Objectif général

Cette étude vise à évaluer le risque de l'interruption du transport afin de mieux comprendre la vulnérabilité de l'accès au territoire. L'étude vise également à modéliser l'évolution de la détérioration du réseau routier permettant la projection de sa vulnérabilité dans le temps.

1.3.2 Objectifs spécifiques

- Estimer la vulnérabilité des routes forestières à partir d'une interruption de flux de transport de bois produit par événement perturbateur.
- Construire un modèle dynamique de détérioration des routes forestières par classe fonctionnelle.

1.3.3 Hypothèses

- La vulnérabilité à la fermeture d'un tronçon diminue avec l'augmentation du nombre d'interconnexions avec d'autres routes qui présentent des alternatives pour arriver à destination, et ce, indépendamment de la classe fonctionnelle.
- Les classes fonctionnelles inférieures des chemins forestiers (classe secondaire et classe tertiaire) présentent une détérioration dans le temps plus importante que la classe fonctionnelle supérieure (classe primaire), étant donné que le

standard de construction de classe supérieure est plus élevé que celui des classes inférieures.

CHAPITRE II

VULNÉRABILITÉ ET DÉTÉRIORATION DES ROUTES FORESTIÈRES

Rihab SAADOUNI¹, Osvaldo VALERIA¹ et Marc J. MAZEROLLE²

¹Institut de recherche sur les forêts, Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable.

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université,
Rouyn-Noranda, Québec. J9X 5E4

²Centre d'étude de la forêt, Département des sciences du bois et de la forêt,
Université Laval, 2405 rue de la Terrasse, Québec, Québec G1V 0A6

2.1 Résumé

Au Québec, les routes forestières présentent des infrastructures essentielles pour accéder aux différentes sections de la forêt et permettre ainsi de récolter le bois et assurer son transport. Plusieurs tronçons sont abandonnés ou mal entretenus ce qui engendre leur détérioration dans le temps. Le seul système existant et qui regroupe des informations liées aux routes forestières est une base de données nommée Routard. Malheureusement, Routard affiche plusieurs défaillances au niveau de la structure, dû à un problème de conception. En effet, Routard ne permet pas une gestion adéquate des routes forestières, qui priorise leur entretien pour garantir l'ininteruption de l'approvisionnement en bois. Notre projet a pour objectifs d'estimer la vulnérabilité des routes forestières à partir d'une interruption de flux de transport de bois produit par événement perturbateur et de construire un modèle temporel de la détérioration des routes forestières par classe fonctionnelle. Dans la même optique, nous visons à prédire le flux de transport de bois, au Témiscamingue, via la méthode Shreve, en additionnant les superficies de coupes converties en volume de bois pour les quatre premiers inventaires écoforestiers disponibles au Québec. Par la suite, l'interruption de flux de transport de bois a été simulée pour la totalité du réseau afin d'exprimer la vulnérabilité selon deux circonstances : existence de route alternative plus longue que la route bloquée ou la route bloquée présentait une issue unique (pas de route alternative) pour arriver à destination. Pour calculer la détérioration des routes forestières, un protocole terrain a été réalisé ($n = 192$).

Les résultats dévoilent une répartition spatiale distincte entre la vulnérabilité issue de la défaillance du lien unique et celle engendrée par la défaillance du lien avec alternative. Dans les deux cas, la vulnérabilité est corrélée au flux du transport de bois. Le modèle de détérioration démontre que les routes de classes inférieures ont un rythme de détérioration plus rapide dans le temps que celui des routes de classes supérieures. Ce rythme de détérioration est dû principalement à la pente et l'influence réciproque de la classe

fonctionnelle et l'âge de la route. La détérioration des routes combinée à la vulnérabilité permettraient à terme de contribuer à développer un outil de planification et de gestion des routes forestières.

Mots clés : route forestière, classes fonctionnelles, flux, vulnérabilité, détérioration, transport, accès aux ressources.

2.2 Introduction

Au Canada, la forêt boréale a subi ces dernières décennies des changements radicaux. Auparavant terre vierge, elle est devenue une source de bois (Gauthier et al., 2008). L'accès est alors devenu un facteur clé pour un transport optimal des ressources ligneuses (Havimo et al., 2017) et pour maximiser les retombées économiques de l'industrie forestière (Sarrazin et al., 2018; Mönkkönen et al., 2008). Au Québec, le nombre de routes forestières ne cesse d'augmenter (Coulombe et al., 2004). Ces routes fragmentent le paysage et augmentent l'isolement entre parcelles d'habitat (Cai et al., 2013; Forman et Alexander 1998). Après les coupes, ces routes sont abandonnées sans aucune mesure de gestion du risque de détérioration (Bourgeois et al., 2007).

En Abitibi-Témiscamingue comme toute autre région forestière au Québec, les routes forestières présentent un élément clef pour la chaîne d'approvisionnement en matière ligneuse (Spaeth, 1998). Les routes forestières sont vulnérables aux événements perturbateurs qui provoquent une interruption du flux de transport de bois et génèrent une grande perte économique dépendamment des produits transportés, de la durée de fermeture, de la distance de détour pour arriver à destination ainsi que le nombre de transports de bois bloqués (Jenelius et Mattsson, 2015; Jenelius et Mattsson, 2008). La rupture des routes forestières peut être provoquée par la détérioration de son état. Des tronçons peuvent être détériorés suite à plusieurs facteurs de site (le dépôt de surface, la structure de drainage et la pente.), techniques (les matériaux de construction et la largeur

de la surface de roulement.) (Brodeur et al., 2002) et la date de construction et d'entretien (Martin et al., 2001). Aujourd'hui, le seul système qui répertorie des informations de routes forestières au Québec est nommé Routard. Cette base de données éprouve plusieurs problèmes au niveau de la structure et ne permet pas une gestion adéquate des plans d'aménagement à moyen et à long terme.

Notre étude vise à estimer la vulnérabilité et mesurer la détérioration des routes forestières pour prévoir une meilleure gestion des routes forestières. Notre première hypothèse avance que la vulnérabilité d'une route à la fermeture d'un tronçon diminue avec l'augmentation du nombre d'interconnexions. Nous avons émis comme deuxième hypothèse que les classes fonctionnelles inférieures de routes (classe secondaire et classe tertiaire) présentent une détérioration dans le temps plus importante que la classe fonctionnelle supérieure (classe primaire).

2.3 Méthodes

2.3.1 Aire d'étude

L'aire d'étude (12 619, 7 km²) (MFFP, 2018) est localisée dans la région du Témiscamingue. Plus précisément, dans les unités d'aménagement 081-51 et 081-52. Le relief est composé de basses collines et de plateaux (Bostock, 1970). Le climat est continental tempéré froid (Chapman et Thomas, 1968), avec une température annuelle moyenne de 2,46 °C et des précipitations annuelles atteignant 82,4 cm (Environnement et Changement climatique Canada 2010). La possibilité forestière a été estimée pour les deux unités d'aménagement à 1 076 600 m³/an pour la période 2015–2018 (Pelletier, 2016). L'accès à ce grand territoire forestier pour l'extraction et le transport du bois est assuré par les routes forestières depuis 1917 avec la construction du « Kipawa Mill » (Danneyrolles, 2016).

2.3.2 Vulnérabilité des routes forestières

Tout d'abord, nous avons identifié les secteurs récoltés ainsi que l'année et la superficie par traitement à partir de la carte écoforestière du quatrième inventaire décennal. Nous avons converti les superficies des quarante dernières années en volume moyen à partir de la répartition des superficies récoltées et des possibilités forestières dans l'unité d'aménagement 081-51 (Morin, 2014), et utilisé une moyenne de 100 m³/ha toutes espèces et types de coupe confondus. Les secteurs de coupes ont été identifiés avec ArcGis 10.5™ (Esri, 2016) afin de déterminer le point d'origine pour le transport de bois et localiser l'usine de transformation de bois la plus proche (destination) avec l'outil *near* sous ArcGis 10.5™. L'itinéraire parcouru pour arriver à destination était le plus court chemin. Pour estimer le nombre de voyages par camion, nous avons considéré que trois camions étaient nécessaires pour transporter 100 m³ de bois (communication personnelle du contremaître RYAM). La fonction *ST_Graph* de l'outil H2Network disponible dans OrbisGIS 5.1 (Lab-STICC, 2017) a permis de convertir la base de données Routard en un graphe composé de liens routiers connectés par des nœuds. Nous avons utilisé dans le calcul de flux toutes les classes fonctionnelles des routes d'été existantes dans la base de données Routard sans égard à leur état. Pour chaque superficie coupée, le nœud le plus proche de ce graphe a été choisi pour identifier l'origine du voyage. L'itinéraire le plus court (Minoux, 1975) a été estimé par l'algorithme Dijkstra (Cherkassky et al., 1993) sous *pgRouting* disponible dans PostGIS 2.3.7 (PostGIS, 2017). La sommation du nombre de voyages par tronçon pour chaque origine et destination à l'aide de la méthode de hiérarchisation de Shreve (Shreve, 1967) a été modélisée sous PostGIS 2.3.7 et nous a permis de calculer le flux du transport de bois. La méthode de classification de Shreve est une analyse pour identifier l'ordre d'écoulement dans un réseau hydrographique. Elle tient compte de l'ensemble des liaisons du réseau qui s'additionnent, ce qui est approprié pour calculer le flux du transport de bois (Shreve, 1967) (Figure 2.1).

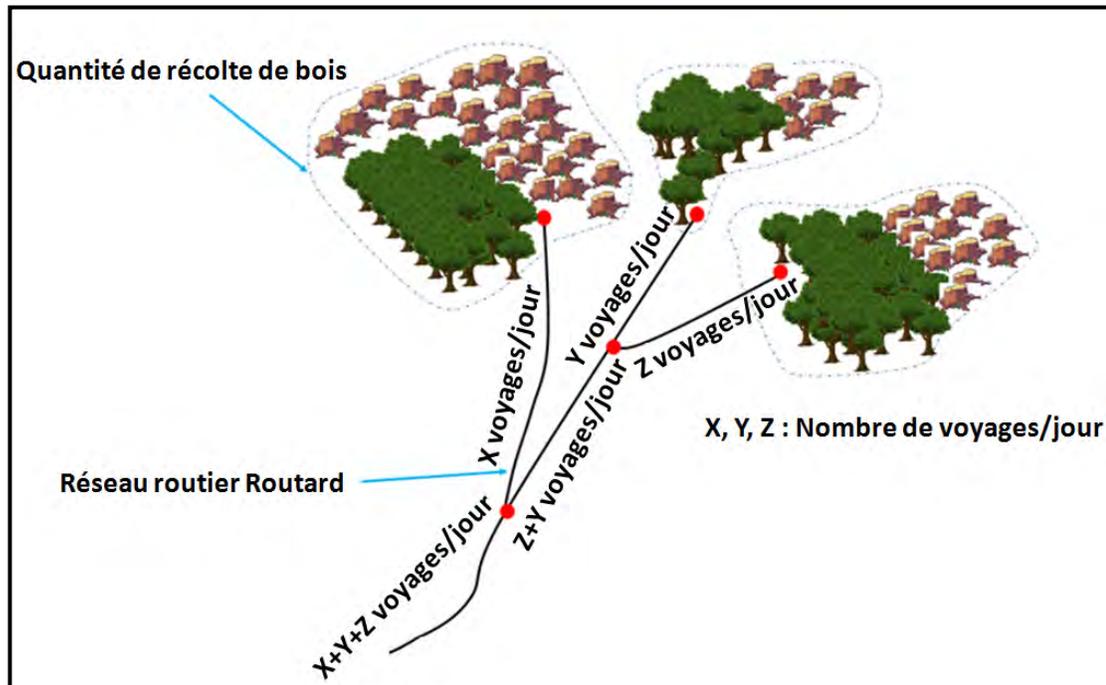


Figure 2.1 Illustration de calcul de la demande de voyages pour un secteur de récolte par période (méthode Shreve).

La vulnérabilité a été déterminée par une analyse spatiale adaptée des travaux de Jenelius et Mattsson (2008) basée sur le concept de l'interruption de flux de transport de bois par un événement perturbateur. Ainsi, une grille de localisation contenant des cellules régulières de 10 x 10 km couvrant les routes forestières de l'aire d'étude a été réalisée avec l'outil *create fishnet* sous ArcGis 10.5TM. L'interruption de flux de transport de bois par un événement perturbateur a été générée par une fenêtre mobile bloquant les liens routiers systématiquement lors de son déplacement dans chaque cellule de la grille afin d'exprimer leur vulnérabilité. En effet, à chaque fois que la fenêtre mobile parcourait une cellule de la grille de localisation, les liens routiers qu'elle couvre étaient hors service. Par la suite, un calcul du flux de transport de bois

a été relancé pour chaque itinéraire et pour chaque cellule fermée. Ce modèle d'interruption de flux de transport de bois intègre les fermetures des liens routiers indépendamment du fait qu'il existe des voies alternatives ou non. La conséquence d'une fermeture d'une cellule présente trois possibilités (Figure 2.2). Pendant la fermeture d'un lien routier et en absence de route alternative, le transport de bois sera bloqué. Dans le cas où un lien routier alternatif existe, le transport de bois parcourra la route alternative la plus courte comme solution pour atteindre la destination plus rapidement, mais tout en augmentant la distance de voyage. Le troisième cas se produit si le transport de bois n'est pas affecté lorsque la cellule fermée ne couvre pas les liens routiers de l'itinéraire le plus court.

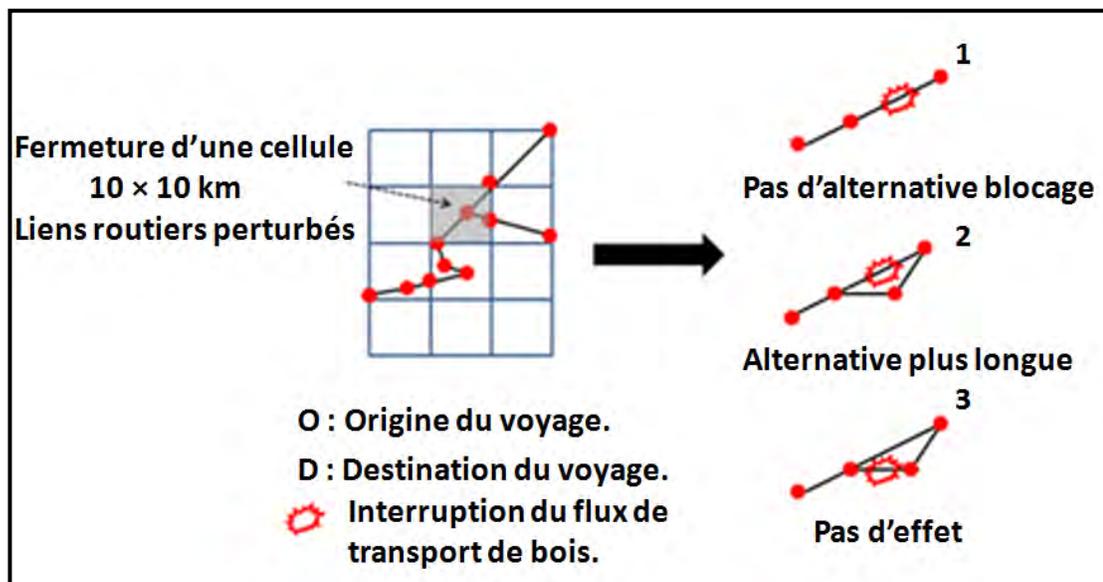


Figure 2.2 Modélisation de l'interruption de flux de transport de bois.

Après avoir appliqué le processus de l'interruption de flux de transport de bois, nous nous sommes intéressés à deux informations pour présenter la vulnérabilité des routes forestières. La première information comprend les itinéraires du transport de bois ayant des liens routiers alternatifs lors de la fermeture d'une cellule c_1 et la vulnérabilité de cette cellule est exprimée comme suit (Équation 1):

$$\mathbf{VRFA}_{c_1} = \sum_{i=p}^{i=q} \left(\frac{\text{Distance de l'itinéraire alternatif} - \text{Distance de l'itinéraire le plus court}}{\text{Distance de l'itinéraire le plus court}} \times \text{nombre de voyages} \right)_i$$

(Équation 1)

Où \mathbf{VRFA}_{c_1} : correspond à la vulnérabilité des routes forestières avec lien alternatif pendant la fermeture de la cellule c_1 et où $i \in [p, q]$, i représente l'identifiant de l'itinéraire le plus court pour le transport de bois.

La deuxième information inclut les itinéraires du transport de bois n'ayant pas de liens routiers alternatifs (lien unique) lors de la fermeture d'une cellule c_1 , ce qui entraîne un blocage total. La vulnérabilité de cette cellule sera formulée par la sommation du nombre de voyages inachevés (Équation 2).

$$\mathbf{VRFSA}_{c_1} = \sum_{i=p}^{i=q} (\text{nombre de voyages inachevés})_i \quad (\text{Équation 2})$$

Où \mathbf{VRFSA}_{c_1} correspond à la vulnérabilité des routes forestières sans lien alternatif pendant la fermeture de la cellule c_1 .

Nous avons choisi de traiter séparément les deux informations puisque les unités de mesure sont différentes et incomparables (Jenelius et Mattson, 2012) : la vulnérabilité des routes sans alternative est exprimée par le nombre de voyages inachevés (nombre

de voyages bloqués) et la vulnérabilité des routes avec alternative est exprimée par la distance additionnelle et proportionnelle au chemin le plus court multiplié par le nombre de voyages débloqués (km - nombre de voyages débloqués).

Pour les deux informations, chaque cellule fermée affiche une valeur de la vulnérabilité qui est affectée aux liens routiers localisés dans la même cellule indépendamment du type de lien (avec alternative ou sans alternative). Autrement dit, la vulnérabilité de ces cellules est causée par un ou quelques liens clés étant intensivement perturbés pour faire subir cette vulnérabilité aux liens qui sont neutres (liens qui ne sont pas réellement responsables de la vulnérabilité) ou aux liens avec une vulnérabilité faible mais qui se trouvent dans la même région de perturbation (Jenelius, 2009). Plus la valeur est élevée, plus la vulnérabilité des liens routiers est importante. La modélisation de l'interruption de flux de transport de bois a été développée sous la plateforme d'administration des bases de données pgAdmin III dans PostgreSQL 9.5 (PostgreSQL, 2017).

2.3.3 La détérioration des routes forestières

La détérioration du réseau routier a été déterminée par classe fonctionnelle (1, 2 et 3) (Lessard-Juneau, 2011) sur le terrain à partir des facteurs environnementaux (type de milieux, le dépôt de surface), facteurs techniques (largeur de surface de roulement, pente) et le temps depuis la construction du réseau et son entretien. Un dispositif expérimental temporaire (N= 192) a été installé à l'été 2017 sur le territoire de Témiscamingue (Figure 2.3) afin de couvrir l'ensemble de classes fonctionnelles présentes sur le site d'étude et les quarante dernières années de construction (selon les quatre premiers inventaires écoforestiers décennaux disponibles). Le protocole terrain a été inspiré des travaux du Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec pour évaluer l'état de détérioration de la chaussée (Brodeur et al., 2002) générée par l'usure et le flux du trafic ou par les

conditions climatiques, le vieillissement, ou à des défauts de construction. Les variables mesurées dans ce dispositif sont :

- Coordonnée GPS du centre du tronçon.
- Largeur d'emprise (cm) : présente la largeur des voies et les accotements.
- Dénivelé avec fossé (degré) : La différence entre le milieu de la surface de roulement et la bordure la plus éloignée du fossé.
- Pente transversale (degré) : est la tangente de l'inclinaison entre le milieu de la surface de roulement et le point situé à 10 mètres de distance.
- Largeur de surface de roulement initiale (cm) : largeur des voies de roulement lors de la construction de la route.
- Largeur de surface de roulement actuelle (cm) : largeur des voies de roulement après une période d'usure de la route, c'est -à dire avec présence de végétation aux abords.
- Profondeur des fossés (cm).
- Diamètre, longueur et type du ponceau.
- Épaisseur de la surface de roulement (cm) : épaisseur de la voie de roulement.
- Dénivelé de la route (degré) : la différence d'altitude entre les deux bordures de la route.

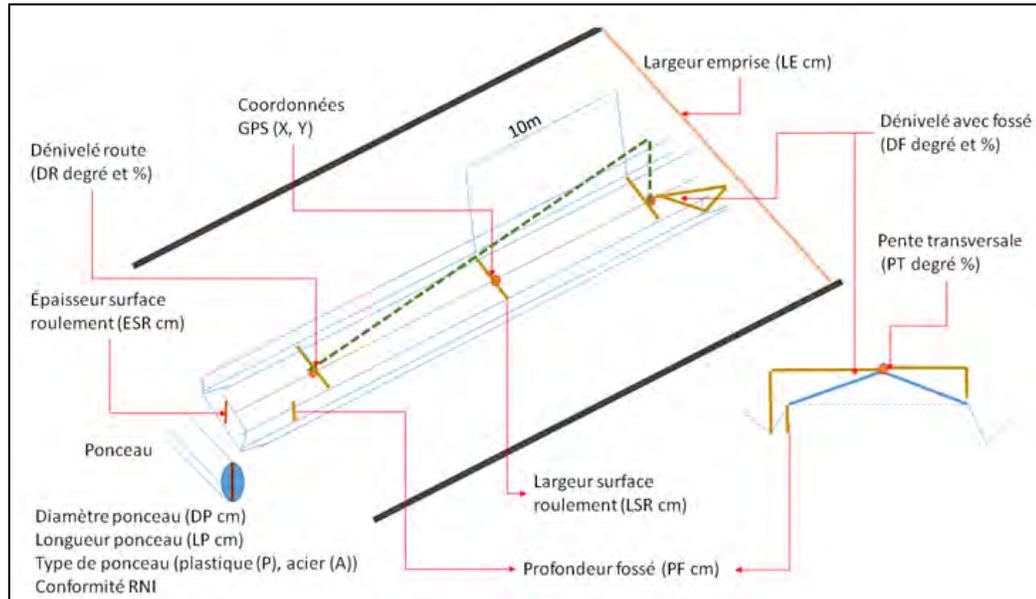


Figure 2.3 Dispositif expérimental à partir duquel les facteurs pouvant expliquer la détérioration des routes ont été mesurés.

Les mesures ont été effectuées sur 111 routes (identification RYAM), des sections de 50 m d'un tronçon ont été choisies avec une distance minimale de 100 m entre les sections selon les conditions d'accessibilités et suivant une sélection stratifiée avec huit répétitions et mesurées selon les trois critères suivants: trois classes fonctionnelles de chemin d'été, deux types de milieux humide ou sec et quatre périodes de construction (selon les 4 inventaires forestiers décennaux). Les modifications importantes au réseau (entretien et amélioration) ont été également considérées dans la sélection des sections à échantillonner. Les dates d'entretien et de construction ont été obtenues à partir des relevés historiques de contremaîtres auprès de la compagnie forestière RYAM à Béarn ainsi que de leurs entrepreneurs.

Plusieurs variables réponse étaient utilisées dans notre modèle de détérioration temporelle des routes forestières. Notamment, le pourcentage surfacique des nids de poule et des ornières par tronçon (*PSNO*) (Équation 3), le pourcentage de perte en surface de roulement par tronçon (*PPSR*) (Équation 4) et d'autres formes de détériorations spécifiques. Ces formes de détérioration spécifiques ont été regroupées et attribuées une qualification subjective selon l'ampleur croissante de détérioration (détérioration niveau 1, détérioration niveau 2, détérioration niveau 3) (Tableau 2.1).

$$PSNO = \frac{\text{superficie de la section} - \Sigma(\text{superficie}_{\text{Nid de poule/ornière}})}{\text{superficie de la section}} \times 100 \quad \text{Équation 3}$$

Dont la superficie_{Nid de poule/ornière} ($S_{N/O}$) est calculée comme suit :

$$S_{N/O} = \text{longueur}_{N/O} \times \text{largeur}_{N/O}$$

$$PPSR = \frac{LSRI - LSRA}{LSRI} \times 100 \quad \text{Équation 4}$$

Où LSRI présente la largeur de la surface de roulement initiale et LSRA présente la largeur de la surface de roulement actuelle.

Tableau 2.1 Description des niveaux de la détérioration pour la variable autre forme de détérioration.

Niveau de la détérioration	Description
<p style="text-align: center;">Niveau 1</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Légère dénudation de la surface de roulement (légère érosion et accumulation des matériaux). -Planche à laver.
<p style="text-align: center;">Niveau 2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Forte dénudation de la surface de roulement (forte érosion et accumulation des matériaux). -Présence d'herbes sur la surface de roulement. -Couvert forestier important (fermeture arbustive). -Route rocheuse (présence de roches). - Sol fissuré.
<p style="text-align: center;">Niveau 3</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Glissement des matériaux importants aux abords de la route. -Eau dans la route (inondation). -Couvert forestier très important (fermeture arbustive). -Affaissement du sol -Ponceau qui affleure la surface de roulement.

Les variables explicatives exploitées pour modéliser la détérioration sont présentées dans le Tableau 2.2 La classe fonctionnelle et l'âge de la route sont issus de la base de données Routard, complétées en cas d'absence d'information et corrigés par le partenaire RYAM.

Tableau 2.2 Variables explicatives exploitées pour déterminer leur effet sur la détérioration des routes.

Variable	Description et source de données
Classe fonctionnelle	Classe 1, 2 et 3. Source Routard, complétées et corrigées par RYAM.
Identifiant du tronçon	Chaque section mesurée appartient à un identifiant de la base de données de RYAM.
Âge de la route	Date de construction et entretien majeur selon Routard et corrigée par les informations disponibles auprès du partenaire RYAM.
Type de milieu	Sec : pas d'accumulation d'eau en surface apparente. Humide : accumulation ou indices d'accumulation d'eau en surface.
Pente	Mesurée en degré par section longitudinale de 50 mètres.
Dépôt de surface	Couche de matériau meuble qui recouvre le roc (quatrième inventaire décennal MFFP)

Nous avons utilisé les boîtes à moustaches, les histogrammes de distribution, calculé les quantiles et les tableaux de contingence afin d'évaluer la relation entre variables. Le résultat montre un effet de confusion de la classe de la pente issue de l'inventaire écoforestier avec la variable pente mesurée dans notre dispositif terrain et avec la variable âge de la route. La classe de drainage issue de l'inventaire écoforestier est confondue avec le type de milieu et la classe fonctionnelle. La pente est confondue avec le dépôt de surface.

À cet effet, les variables classe de la pente, la classe de drainage et le dépôt de surface ont été exclues de notre modèle de détérioration.

Pour caractériser la détérioration des routes forestières, nous avons construit un modèle linéaire mixte en incluant la pente, l'âge de la route, la classe fonctionnelle et leur interaction comme effets fixes. Puisque plusieurs tronçons se trouvaient dans chaque route, nous avons inclus l'identifiant de la route comme effet aléatoire. Afin de tenir compte d'effets de l'âge potentiellement différents entre les routes (différent substrat, circulation, historique d'entretien), nous avons inclus un effet aléatoire de l'âge (différent pour chaque route). Finalement, puisque la détérioration doit être de zéro l'année de construction de la route, nous avons forcé l'ordonnée à l'origine à zéro. Les paramètres du modèle ont été estimés à l'aide du maximum de vraisemblance à l'aide du package lme4 (Bates et al., 2019).

2.4 Résultats

2.4.1 Flux de transport de bois

La carte de flux de transport de bois pour l'UA 81-51 illustre un réseau routier de 5283 km de chemin d'été (le flux de transport de bois pour l'Abitibi-Témiscamingue est représenté en Annexe A). La route qui est proche de l'usine de Témiscaming (route collectrice) a un flux plus important ($\approx 170\,000$ voyages) par rapport aux routes localisées plus en amont de l'usine. La superficie totale des secteurs de coupe de bois simulée dans le transport de bois via notre étude et pour les quarante premières années des inventaires écoforestiers représente presque 60 495 hectares de bois récoltés et transportés par environ 181 485 voyages.

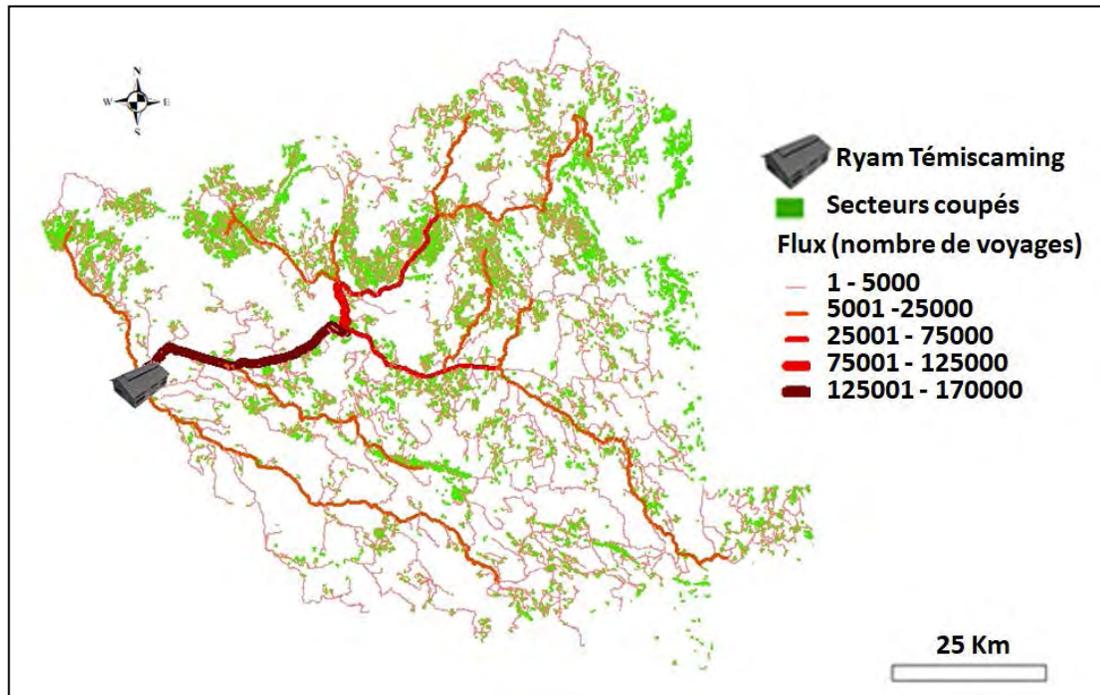


Figure 2.4 Carte de flux de transport de bois simulé (nombre de voyages total pour l'ensemble de la période d'analyse) pour l'UA 81-51, les traits les plus épais localisés entre l'usine (Gris) et les secteurs de coupe (Verts) représentent les flux les plus importants.

La structure du réseau routier de flux de transport de bois dans l'UA 81-51 (Tableau 2.3) démontre que 44,6% sont des chemins non carrossables et que 32,8% présentent des routes forestières de classe fonctionnelle tertiaire (toujours selon Routard). Les chemins non carrossables sont majoritairement localisés à proximité des secteurs de coupes et connectés avec les routes forestières de classe fonctionnelle tertiaire.

Tableau 2.3 Structure du réseau routier (description de classe) de flux simulé et emprunté par le transport de bois dans l'UA 81-51.

Base de données topographiques du Québec	Longueur	Pourcentage
description selon Routard	empruntée	(%)
	(km) *	UA 85-51
Chemin non carrossable	2353,6	44,6
Route forestière tertiaire et Chemin forestier classe 3	1732,9	32,8
Chemin carrossable non pavé	511,1	9,7
Route forestière secondaire et Chemin forestier classe 2	255,4	4,8
Route forestière primaire et Chemin forestier classe 1	138,8	2,6
Chemin carrossable pavé	36,1	0,7
Total	5027,9	95,2

* Note : Seules les classes fonctionnelles des routes les plus importantes (longueur de lien) sont présentées.

2.4.2 Vulnérabilité liée à l'interruption de flux de transport de bois

L'interruption de flux de transport de bois résulte en deux cartes. La première carte (Figure 2.5) démontre la vulnérabilité des routes forestières ayant des liens alternatifs. Cette carte révèle que la vulnérabilité des routes ayant des liens alternatifs est plus accentuée au centre du réseau et à proximité de l'usine de transformation de bois.

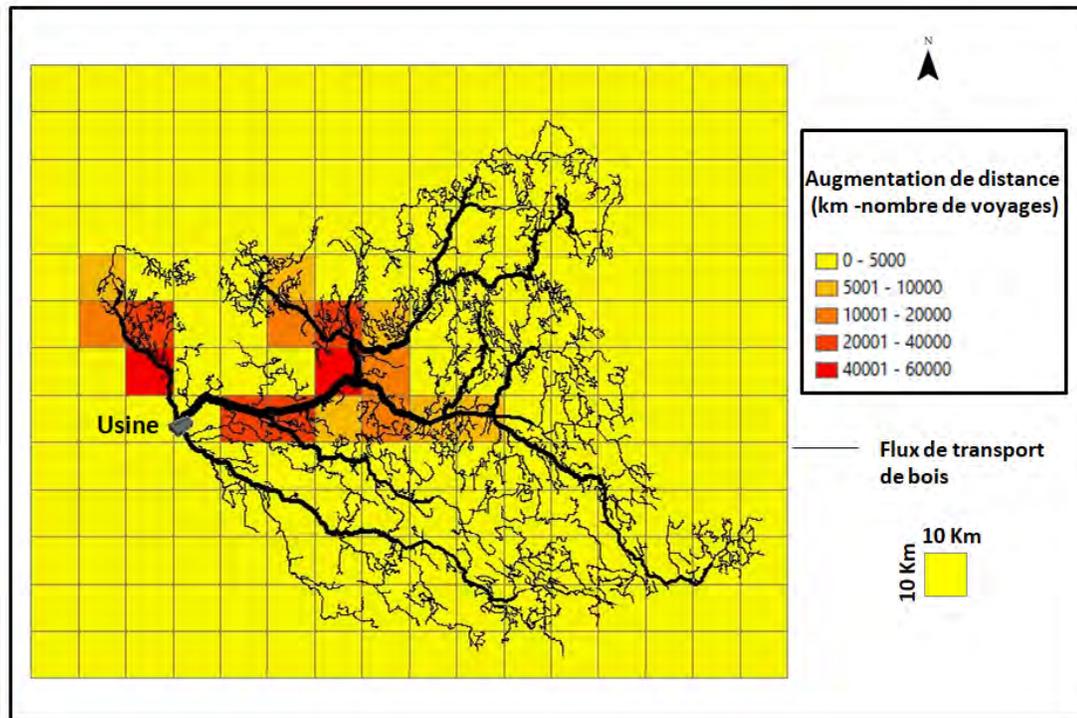


Figure 2.5 Vulnérabilité des routes avec liens alternatifs UA 81-51, cumulée pendant la période d'analyse (40 ans), superposée au flux de transports de bois (voir Figure 2.4), exprimée en nombre de kilomètres additionnels parcourus et proportionnels au chemin le plus court multiplié par le nombre de transports de bois débloqués lors d'une interruption pour atteindre l'usine par les liens alternatifs (km - nombre de voyages débloqués).

Les cellules les plus vulnérables lors du blocage des routes ayant des alternatives présentent un niveau de vulnérabilité comprise entre 20 000 et 60 000 (km-nombre de voyages débloqués). Ce même niveau de vulnérabilité affecte environ 461 km de routes composées majoritairement (> 60%) de routes de classe 3 et des chemins non carrossables (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 Structure du réseau routier (description de classe) localisé dans les cellules d'une vulnérabilité $\geq 20\ 000$ (km - nombre de voyages débloqués) dans l'UA 81-51 et engendrée principalement par le blocage des routes ayant des alternatives.

Base de données topographiques du Québec	Longueur	Pourcentage
description selon Routard *	empruntée	(%)
	(km) *	UA 81-51
Chemin non carrossable	167,9	36,5
Route forestière tertiaire et Chemin forestier classe 3	118,9	25,8
Route forestière primaire et Chemin forestier classe 1	26,3	5,7
Route locale pavée et route nationale pavée	16,6	5,4
Route forestière classe 4	20,7	4,5
Voie de communication abandonnée	6,4	1,4
Total	356,8	79,3

* Note : Seules les classes fonctionnelles des routes les plus importantes (longueur de lien) sont présentées.

La carte (Figure 2.6) dévoile la vulnérabilité des routes forestières sans liens alternatifs. Les cellules les plus vulnérables lors du blocage des routes sans liens alternatifs (lien unique) génèrent une vulnérabilité égale à 5000 voyages bloqués, touchent 1 073 km de routes comportant essentiellement selon la classification Routard 42,3% de route tertiaire, 34,2% de chemin non carrossable, 7,9% de chemin carrossable non pavé, 4,6% de route primaire et 2,3% de route secondaire.

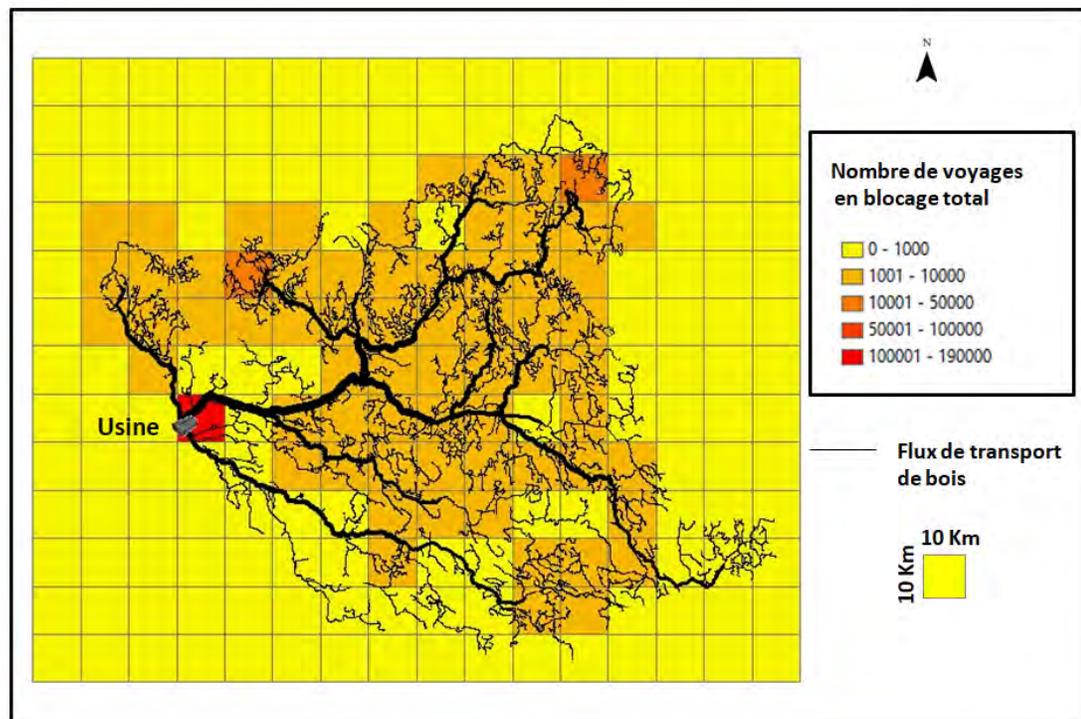


Figure 2.6 Vulnérabilité des routes sans liens alternatifs UA 81-51, cumulée pendant la période d'analyse (40 ans), exprimée en nombre de voyages en blocage total et superposée aux flux de transport de bois (voir Figure 2.4).

La vulnérabilité selon la classe fonctionnelle (Figure 2.7 et Figure 2.8) se comporte différemment selon le type de lien interrompu (lien avec alternatives ou lien unique). Une vulnérabilité des routes de classe 1 est proportionnellement plus élevée lors du blocage des liens sans alternatives et moins importante lors du blocage des liens avec alternatives. De même, une vulnérabilité des routes de classe 2 est plus importante lors du blocage des liens avec alternatives et moins importante lors du blocage des liens sans alternatives. (Figure 2.7). Les chemins non carrossables ainsi que les routes

forestières de classe 3 présentent une vulnérabilité plus importante par rapport aux autres classes fonctionnelles et indépendamment du type de lien interrompu.

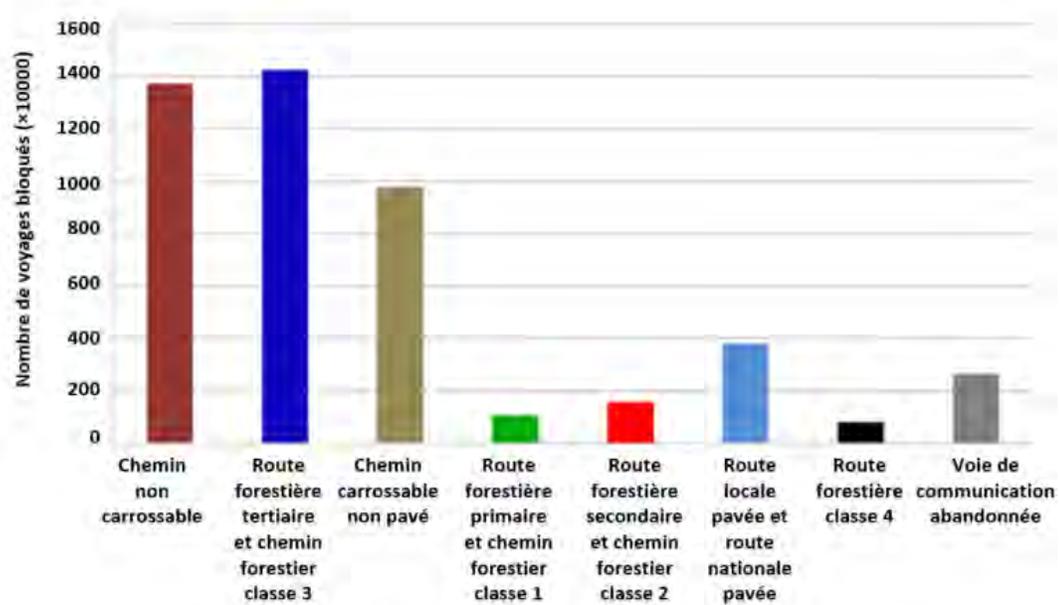


Figure 2.7 Vulnérabilité générée par le blocage des routes forestières sans liens alternatifs (nombre de voyages bloqués) selon la classe de route.

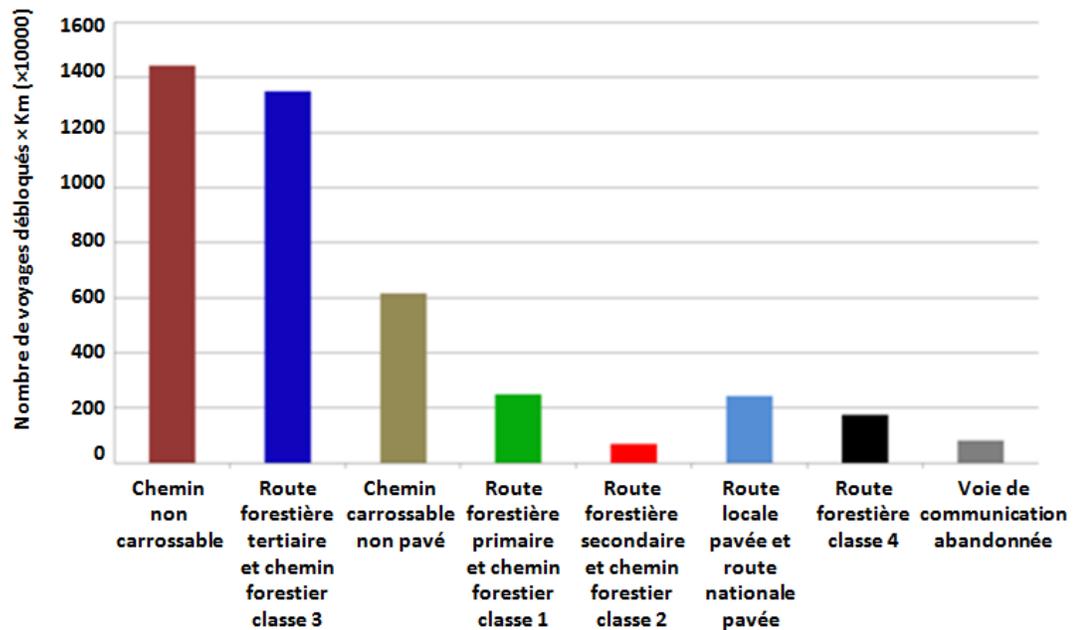


Figure 2.8 Vulnérabilité générée par le blocage des routes forestières avec liens alternatifs (km - nombre de voyages débloqués) selon la classe de route.

2.4.3 Modélisation de la détérioration des routes forestières

Sur la figure 2.9, boîte à moustaches de la variable âge de la route, la médiane de l'âge des routes se situe à 18 ans, le quart des routes récemment construites se situe entre 1 et 9 ans. La moitié des routes d'âge de construction moyenne se situe entre 9 et 25 ans et le dernier quart des routes les plus vieilles se situe entre 25 et 44 ans. Aucune valeur atypique ne se trouve au-delà de la frontière haute (44 ans).

Sur la figure 2.10, boîte à moustaches de la variable pente, la médiane des pentes se situe à 3 degrés, le quart des pentes les plus faibles se situe entre 0 et 1 degré. La moitié des pentes moyennes se situe entre 1 et 5 degrés et le dernier quart des pentes les plus

accentuées se situe entre 5 et 10 degrés. Onze tronçons de pente 15 degrés, un tronçon de pente 12 degrés et un tronçon de pente 30 degrés de classe fonctionnelle 1 sont atypiques par rapport aux restes des tronçons. Les *outliers* présentent 6,7% de nombre des variables totales.

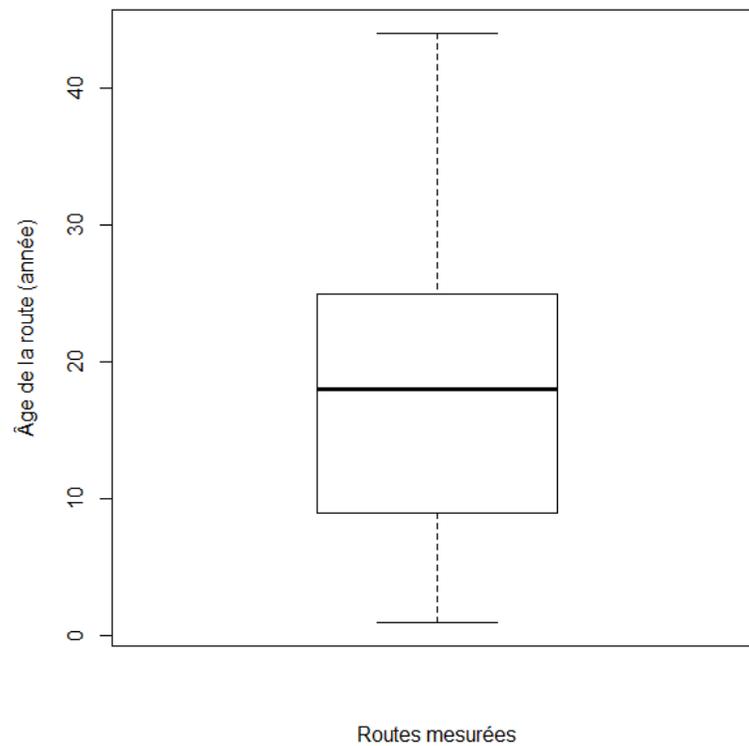


Figure 2.9 Distribution de la variable âge (année) des données acquises pour mesurer l'état de la route.

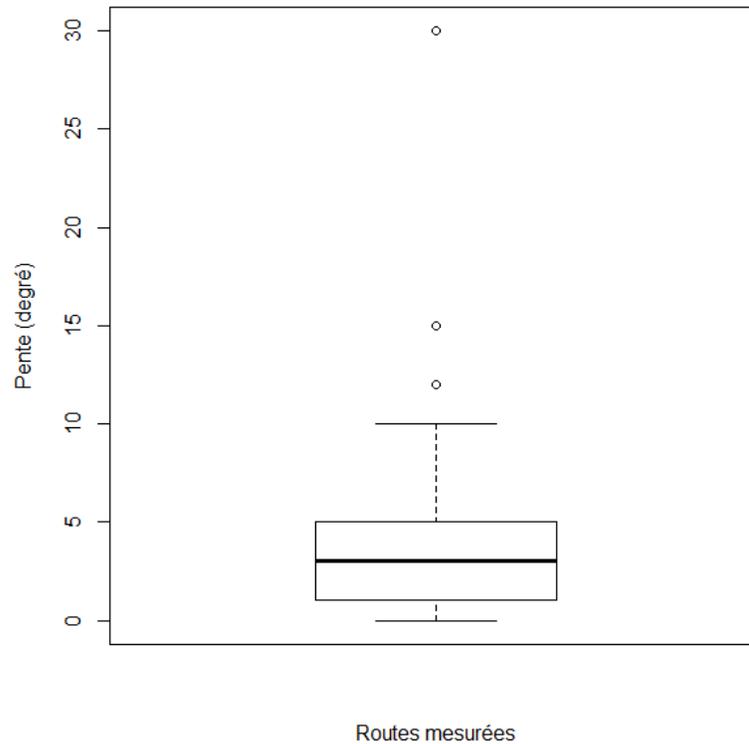


Figure 2.10 Distribution de la variable pente (degré) des données acquises pour mesurer l'état de la route.

Seules les variables réponses avec une bonne distribution ont été utilisées pour modéliser la détérioration. À cet effet, nous avons utilisé les boîtes à moustaches, calculé les quantiles et les tableaux de contingence. Le résultat montre que la variable (*PSNO*) et la variable autres formes de détériorations présentent respectivement 61% et 30% des tronçons qui sont égaux à zéro. De plus, la variable autres formes de détériorations est difficile à estimer sur le terrain. Pour modéliser la détérioration, nous n'avons gardé que la variable (*PPSR*). L'analyse de la variable réponse, le pourcentage de perte en surface de roulement (*PPSR*) montre que la *PPSR* se diffère entre les trois classes fonctionnelles et présente un bon gradient (Figure 2.11).

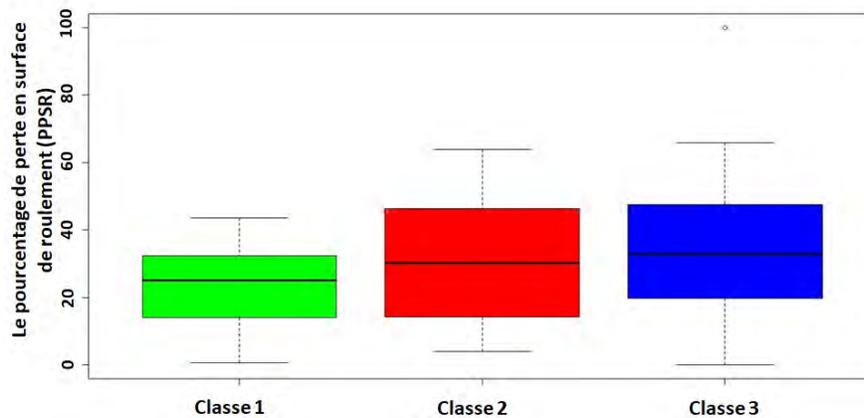


Figure 2.11 Distribution du pourcentage de perte en surface de roulement (PPSR) selon la classe fonctionnelle.

La détérioration de la route augmentait avec l'âge et cette relation différait selon la classe fonctionnelle ($\chi^2 = 11.04$, $df = 2$, $P = 0.004$, Tableau 2.5). De même, la détérioration de la route augmentait avec la pente ($\chi^2 = 16.77$, $df = 1$, $P < 0.001$, Tableau 2.5).

Tableau 2.5 Estimation des différents effets fixes qui expliquent la détérioration de la route.

Paramètres	Estimations	Intervalles de confiance à 95%
Pente	0.922	[0.492, 1.356]
Age route: classefonctionnelle1	6.288	[3.784, 8.798]
Age route: classefonctionnelle2	8.956	[6.664, 11.246]
Age route: classefonctionnelle3	11.746	[9.627, 13.858]

Le rythme de détérioration des routes est plus rapide pour les classes inférieures. À titre d'exemple après 10 ans d'usage de la route forestière de classe fonctionnelle 1 le pourcentage en perte de surface de roulement est estimé à environ 15% tandis que pour la classe fonctionnelle 2 et 3 affichent respectivement 22% et 30% pour la même durée. À noter que nous avons multiplié la variable (*PPSR*) par cent pour faciliter l'interprétation (Figure 2.12).

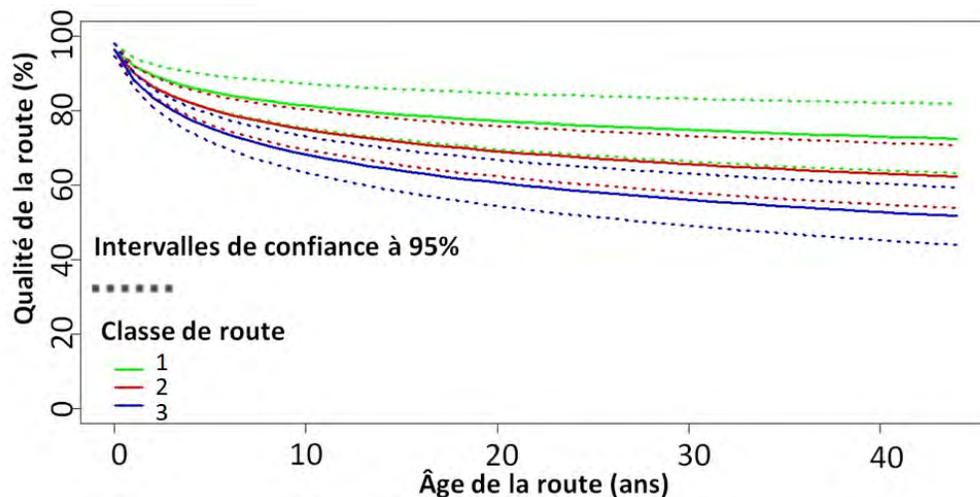


Figure 2.12 Courbes de la détérioration des routes forestières selon le PPSR en fonction de la classe fonctionnelle et au cours du temps (années) obtenues à partir du modèle mixte.

2.5 Discussion

2.5.1 Flux et vulnérabilité des routes forestières.

Notre hypothèse proposant que plus une route est interconnectée (ayant une alternative), moins elle sera vulnérable à la fermeture d'un tronçon a été rejetée par nos

résultats. La vulnérabilité d'un lien unique et d'une route avec un lien alternatif ne sont pas comparables. En effet, la distribution géographique de l'importance de la vulnérabilité présente une forte corrélation avec la concentration de flux de transport de bois. L'existence d'une route alternative ou non, à son tour, est fortement corrélée avec le volume de bois transporté (flux). Les liens avec alternatives sont majoritairement localisés à proximité de l'usine (destination) et dans le centre du réseau routier, conduisent à un nombre important de transports de bois (flux très important). Nevečerel et al. 2007 et Grigolato et al. 2013 ont étudié la répartition spatiale du flux de transport de bois. Les résultats de ces derniers sont cohérents avec notre analyse et montrent que le flux le plus important se localise à proximité des routes de classes supérieures proches de la destination.

Lors d'une rupture d'un lien avec alternatives, la forte disponibilité des itinéraires atténue l'impact de l'interruption de flux (la vulnérabilité). En effet, le transport de bois est débloqué pour arriver finalement à destination mais en parcourant des kilomètres additionnels. Naderializadeh et Crowe (2018) ont eu des résultats similaires au niveau du potentiel des routes denses à réduire les coûts de transport par rapport aux routes à faible connectivité ou à lien unique.

Concernant les routes situées les plus en amont du réseau et qui relient les parcelles de coupe, elles se caractérisent par le lien routier unique (sans alternative) ainsi qu'un flux moins important. Lors d'une rupture d'un lien sans alternatives, le transport de bois est totalement bloqué sans aucune issue. Puisque le flux de transport de bois est plus élevé dans les secteurs de coupe avec un volume de bois important, il en résulte que les impacts de l'interruption seront les plus graves dans ces secteurs.

Les deux formes de vulnérabilité illustrent deux unités de mesure différentes. La première unité est le nombre de camions débloqués et proportionnels aux kilomètres

additionnels (blocage du lien avec alternative) et la deuxième unité présente le nombre de camions bloqués (blocage du lien unique). De plus, les deux formes de vulnérabilité montrent nettement différentes répartitions géographiques. Donc les deux formes de vulnérabilité doivent être évaluées séparément. La comparaison du niveau de vulnérabilité doit se faire à l'intérieur de chaque forme de vulnérabilité et non pas d'une forme par rapport à l'autre. Cette approche n'a pas encore été appliquée dans le réseau urbain pour être synthétisée dans des étapes ultérieures (Jenelius et Mattsson, 2012). Dans le même ordre d'idées, la vulnérabilité génère un coût soit pour le transport de bois qui est bloqué au niveau des chemins avec alternatives (distance additionnelle pour arriver à destination), soit pour le transport de bois qui est bloqué au niveau des chemins sans alternatives (transport inachevé). D'Este et Taylor (2003) ont analysé la vulnérabilité des liens et des nœuds. D'Este et Taylor (2003) déduit que le lien unique est plus vulnérable que d'autres liens plus connectés et que l'interruption d'un lien unique provoque le blocage du transport et aucune alternative n'existait pour les débloquent. D'Este et Taylor (2003) trouvent qu'un nœud connectant des liens est vulnérable lors du blocage de quelques liens qui correspondait à diminuer l'accessibilité. Jenelius et Mattsson (2012) ont étudié la vulnérabilité des routes asphaltées dans les zones urbaines. Conformément à nos résultats, Jenelius et Mattsson (2012) ont démontré que la vulnérabilité des routes asphaltées est spatialement corrélée avec la concentration de la demande de voyage où la population est plus importante. Également pour Qiang et Nagurney (2008) qui ont conclu que la vulnérabilité est influencée par le flux de transport.

La vulnérabilité des routes de classe 1 et des routes classe 2 se comportent différemment selon le type de lien interrompu (lien avec alternative ou lien unique). Lors d'une interruption de lien unique, la vulnérabilité des routes de classe 1 est plus élevée que dans les routes de classe 2. Tandis que lors d'une interruption de lien avec alternatives, la vulnérabilité des routes de classe 2 est plus importante que dans les routes de classe 1. Ce

résultat s'explique par le fait que les routes de classe 1 en général sont des routes continues et moins connectées (Xie et Levinson, 2007) (exemple le cas des autoroutes pour les routes asphaltées), donc une faible proportion des liens alternatifs, d'où la vulnérabilité est plus élevée pour les routes forestières de classe 1 lors du blocage des routes sans alternatives. Contrairement aux routes de classe 2 qui sont plus connectées, donc la vulnérabilité est plus élevée lors du blocage des routes avec alternatives. Cependant, la proportion de la vulnérabilité des routes de classe 1 et des routes classe 2 est très rapprochée lors du blocage des routes sans alternatives. Ce faible écart de vulnérabilité pour le type de blocage des liens uniques peut être traduit par le fait que certaines routes considérées dans Routard comme étant classe 2 (route avec alternatives) étaient auparavant routes classe 1 (route sans alternatives). Ce processus de changement fonctionnel des routes forestières est effectif pour des stratégies de rotation de coupe et d'ordonnement spatial de la récolte (Goycoolea et al. 2009, Shan 2009). En effet, après la fin de coupes de bois, la forêt est préservée de toute coupe afin de garantir sa régénération naturelle, donc les routes qui assurent sa connectivité avec la destination sont abandonnées et non entretenues. Après la régénération de la forêt, les exploitants forestiers reprennent leur activité tout en empruntant ces mêmes routes détériorées qui ont perdu leur niveau fonctionnel et qui seront sûrement praticables avec un entretien mineur. Cette dynamique est plus visible dans les routes de classes 3 et les chemins non carrossables. L'écart selon ces deux dernières classes fonctionnelles est très faible lors d'une rupture de lien avec alternatives et lors d'une rupture d'un lien unique. De plus, une vulnérabilité très élevée des routes de classes 3 et des chemins non carrossables coïncide avec un pourcentage élevé (77%) qui structurent le réseau emprunté par le flux de transport de bois (UA 81-51), composé par les deux mêmes classes fonctionnelles. Le processus de changement fonctionnel de la route d'une classe supérieure à une autre inférieure par défaut d'entretien génère un coût environnemental (érosion, sédiment dans les milieux humides, perte de diversité) et économique (perte de valeur fonctionnelle) très important

(Benítez – López et al., 2010). Ce coût d'abandon temporaire et sans aucun suivi des routes forestières (Luce, 1997) risque de dépasser les coûts liés aux entretiens fréquents pour restaurer la route et son niveau fonctionnel. D'ailleurs plusieurs infrastructures comme les fossés, les ponceaux et les ponts sont liées aux routes forestières et assurent le drainage forestier (Côté, 2015) seront affectées simultanément par la procédure d'abandon de la route.

La taille de la cellule utilisée dans notre étude détermine l'extension spatiale de l'ampleur de l'interruption. Dans notre cas, nous avons choisi des cellules de 10 x 10 km qui décrivent l'étendue spatiale de l'événement perturbateur par exemple des fortes chutes de neige ou des chutes d'arbres après une forte tempête. De plus, cette taille de cellule nous a permis de contrôler le détail et la précision de l'analyse par rapport à la charge de calcul. Jenelius et Mattsson (2012) ont comparé différentes tailles de cellule (30 km, 25 km et 12,5 km) dans leur analyse pour la vulnérabilité. Jenelius et Mattsson (2012) ont déduit que l'augmentation de la taille de cellule provoque une augmentation parallèle de sa vulnérabilité moyenne. Le choix de la taille de la cellule dépend de la nature de l'étude. Pour des analyses de précision, l'utilisation d'une grille composée de cellules de 25 x 25 m (Chung et Sessions, 2001) et de cellules de 50 x 50 m (Anderson et Nelson, 2004) permettra d'intégrer la topographie ainsi que la particularité de la forêt dans la modélisation.

La correction topologique effectuée dans la base de données Routard pour rectifier les erreurs de numérisation consistait à relier les tronçons de route connectés avec une tolérance de cinq mètres. Cette tolérance ne couvre pas totalement les erreurs de rupture qui peuvent s'étendre à l'échelle de kilomètres. Bien que conservateurs dans notre approche, nous préférons ne pas augmenter la valeur de la tolérance de jointure des tronçons afin de ne pas altérer des connexions qui n'étaient pas réelles sur le terrain. Dans la région de Témiscamingue (zone de calcul de la vulnérabilité 081-51) et après

la correction topologique, le nombre d'itinéraires déconnectés sous Routard est de 460. Cependant, pour cerner l'influence de cette contrainte sur notre étude, nous avons vérifié la somme des superficies non transportées suite à cette erreur topologique pour l'ensemble du territoire et qui affichait un patron négligeable et similaire pour les différentes unités d'aménagement (Tableau 2.6).

Tableau 2.6 Connectivité des itinéraires sous Routard.

Usines	UA	Nombre de parcelles à couper	Nombre d'itinéraires possibles sur terrain	Nombre d'itinéraires connectés sous Routard	Nombre d'itinéraires déconnectés sous Routard
Béarn	081-52	11250	2908	2756	152
La Sarre	085-51	21832	5950	5471	479
Témiscaming	081-51	13347	4848	4388	460
Val d'Or	083-51	114017	20900	19426	1474
Ville Marie	081-52	9318	2816	2651	165
Amos	086-51	64501	10864	8845	2019

Dans cette étude, deux points importants qui concernent la modélisation du flux de transport de bois sont à évoquer. Le premier point concerne la modélisation appliquée dans le bassin de Témiscaming qui n'a pas pris en considération les routes forestières existantes en dehors de ce bassin. L'itinéraire le plus court est présenté pour chaque origine afin de se rendre à Témiscaming mais le fait d'intégrer d'autres liens routiers dans le modèle, présente probablement d'autres alternatives. Le deuxième point, la structure du réseau routier forestier a été conçue pour servir de lien direct avec l'usine, notre méthode de calcul de flux suivant un critère simple comme parcourir le plus court chemin pour arriver à destination est appropriée pour ce type de réseau. En revanche, d'autres critères plus complexes comme la demande en volume de bois pour les usines, le confort de roulement de la route et le temps de voyage (Coulter et al., 2006a; Picard

et al., 2006) peuvent être intégrés dans des futures analyses pour bonifier la modélisation de la vulnérabilité. Svenson et Fjeld (2017) se sont intéressés quant à eux à la durée du cycle de l'exploitation forestière. Ce critère temporel est un facteur primordial pour préciser la tarification correcte du transport et déterminer ainsi la criticité du lien routier.

Le flux indique le taux de fréquentation de la route, qui pourra servir dans d'autres études comme indicateur parmi d'autres pour qualifier la classe fonctionnelle de la route et aussi pour optimiser le trafic du transport de bois. La vulnérabilité permet de localiser les routes les plus vulnérables afin de prendre les précautions nécessaires pour éviter une éventuelle interruption. En effet, la modélisation de flux de transport de bois et de la vulnérabilité des routes forestières est appliquée jusqu'à aujourd'hui sur les routes urbaines. Notre étude est une des premières qui s'intéresse à caractériser les routes forestières par une analyse évaluative. L'étude de la vulnérabilité permet aussi de garantir une ininteruption du transport de bois ainsi que réduire les impacts négatifs sur le plan écologique et éviter des pertes économiques qui en découlent. D'autre part, une analyse de suivi annuelle de la vulnérabilité (étude élastique) permettra de comparer l'évolution temporelle afin de mieux adapter les ressources (Qiang et Nagurney, 2008). Comme perspective, cette étude peut être combinée avec une étude épidémiologique pour mettre en évidence l'apport du transport de bois dans la transmission des maladies (Zobel et al., 1985). Côté outils, nous avons utilisé plusieurs logiciels libres dans cette étude dans le but que l'exercice soit reproduit par le public. Plusieurs algorithmes sont déjà développés dans ces logiciels, ce qui nous a facilité la tâche et nous a épargné beaucoup de temps de développement informatique.

2.5.2 Détérioration des routes forestières

Conformément à notre hypothèse, la détérioration des routes est variable selon la classe fonctionnelle et le rythme est plus rapide dans les classes inférieures (classe 3) que dans

les classes supérieures (classe 1 et 2). En effet, la détérioration est principalement influencée par la pente et selon la classe fonctionnelle de la route associée à son âge. Brown, et al. (2010) ont déduit dans leur étude que la détérioration de la rugosité des routes est fortement corrélée au flux de transport. Quant à Gupta et al. (2011), ils ont associé à la variable flux pour leur étude sur la détérioration, plusieurs variables d'ordre technique telles que le CBR (California Bearing Ratio¹) du sol de fondation, l'épaisseur de la chaussée ainsi que la déviation de la surface de roulement, la qualité de roulement et la rugosité de surface. Dans notre projet et en raison des contraintes de temps, le volet flux du transport de bois n'a pas été intégré dans l'évaluation de la détérioration. Pour des futurs travaux de recherche sur la détérioration des routes forestières, l'inclusion de la variable flux s'avère être intéressante.

Le coût de transport du bois ainsi que les coûts moyens liés aux chemins forestiers au Québec présentent respectivement 24,8% et 12,2% du coût moyen d'approvisionnement (Groupe DDM, 2016). La détérioration de ces routes forestières engendre leur érosion et occasionne un apport massif de sédiments (Gucinski 2001, Bilby et al. 1989) dans les cours d'eau, les lacs et les milieux humides et perturbe ainsi la diversité aquatique (Lacombe 2015, Dallaire 2006; O'hanley et Tomberlin 2005). Face aux impacts négatifs sur les services écosystémiques (Coffin, 2007; Forman et Alexander 1998), les principaux utilisateurs des routes forestières (usines de transformation de bois) doivent changer leur stratégie de gestion des routes forestières et se doter d'une vision à long terme afin de minimiser les pertes économiques tout en respectant la réglementation. Les coûts entraînés par la détérioration des routes seraient

¹California Bearing Ratio est un test de pénétration utilisé pour évaluer la résistance du sol de fondation des routes et des chaussées.https://en.wikipedia.org/wiki/California_bearing_ratio (Août 2019).

encore plus importants que ceux du transport de bois et de la construction des routes (Côté, 2015).

Nous avons utilisé le pourcentage de perte en surface de roulement comme variable réponse pour qualifier la détérioration parmi d'autres calculées, notamment le pourcentage surfacique des nids de poule et des ornières et autres formes de détériorations spécifiques. Des routes forestières peuvent présenter un faible pourcentage de perte en surface de roulement mais contiennent d'autres formes de détérioration plus accentuées comme les nids de poules et les ornières. L'évaluation de la détérioration seulement en fonction du pourcentage de perte en surface de roulement permet d'avoir un tracé général pour les trois classes fonctionnelles des routes forestières. Toutefois, l'intégration de nouvelles variables explicatives comme le flux (taux de fréquentation de la route) (Sheridan et al., 2006) et le type des matériaux de constructions combinées à des outils de télédétection (Song et Civco 2004; Zhang et al., 2002) pourraient bonifier et compléter des analyses futures de la détérioration. Malheureusement, de telles variables n'étaient pas disponibles dans notre étude. Néanmoins, nos résultats du rythme de la détérioration selon la classe fonctionnelle nous permettront de prédire l'année approximative pour effectuer des entretiens et des réparations, et cela pour chaque classe fonctionnelle.

Finalement, afin d'allouer des ressources pour gérer efficacement l'état des routes forestières et réussir une planification pertinente, il est nécessaire de combiner les calculs d'impact (vulnérabilité et détérioration) avec des estimations de la fréquence avec laquelle les différents types d'événements perturbateurs affecteront le territoire. En effet, l'intégration des impacts des changements climatiques sur les infrastructures routières est aussi une préoccupation économique importante (Nivedya et al., 2019).

2.6 Conclusion

Notre étude exploratoire sur les routes forestières visait à évaluer l'état des routes sous deux aspects distincts mais complémentaires. D'une part, l'évaluation de l'efficacité du réseau routier forestier à assurer le transport de bois lors d'une rupture (vulnérabilité), et, d'autre part, l'évaluation de l'aspect dynamique (détérioration) du réseau routier. En effet, le processus d'analyse de la vulnérabilité combiné avec l'évaluation du niveau de détérioration, fournit un outil de suivi et de prédiction pour anticiper la fréquence des impacts avec laquelle des perturbations dans le réseau routier forestier se produisent. La classification fonctionnelle des routes forestières est aussi importante car elle indique la vitesse de la détérioration des routes. Avec, une meilleure information sur la classe fonctionnelle des routes combinée à la vulnérabilité et la détérioration, nous pourrions développer un système qui permettra la gestion et la planification adéquate du réseau routier forestier. Le travail réalisé durant cette maîtrise est la première étape pour la conception d'un tel système.

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre étude, visait à vérifier et à mesurer la vulnérabilité issue d'une interruption de flux (Jenelius et Mattsson, 2008) de transport de bois et la détérioration des routes forestières (Coulter et al., 2006b). La vulnérabilité et la détérioration des routes par classes fonctionnelles influencent directement tant la chaîne d'approvisionnement (arrêt des opérations, perte économique, etc.) que le plan écologique (érosion, colmatage des frayères, etc.) (Underhill et Angold, 2000).

En premier lieu, nous avons modélisé le flux de transports de bois conditionné par la distance la plus courte pour arriver à destination (Minoux, 1975). La carte de flux illustre l'abondance du taux de fréquentation des routes forestières par le transport de bois pendant les quatre premiers inventaires écoforestiers. En second lieu, nous avons simulé la vulnérabilité des routes forestières sans lien alternatif ou avec un ou plusieurs liens alternatifs. La forme de vulnérabilité des routes avec lien alternatif montre des valeurs plus élevées au niveau des tronçons proches de l'usine (les tronçons collecteurs) et au centre du réseau, que dans les tronçons les plus en amont. Cela s'explique par le fait que le nombre de transports de bois s'accumule de plus en plus qu'on se rapproche de l'usine (destination), et que lors d'une interruption, la distance parcourue pour faire le détour est relative au nombre de véhicules nécessaires au transport (km/transport). Par la suite, nous avons simulé la vulnérabilité des routes forestières n'ayant aucune alternative. Dans ce

dernier cas, la vulnérabilité est plus accentuée dans les tronçons qui relient les parcelles de coupes avec les tronçons collecteurs du réseau (en amont du réseau). Cela se justifie par le fait que les routes conçues pour accéder aux secteurs isolés dans la forêt (flux moins important) sont généralement des routes temporaires sans itinéraire facultatif. Nous concluons que dans cette étude, la vulnérabilité est dépendante du nombre de voyages et de l'inter connectivité des routes (existence des routes alternatives).

La principale différence entre les projets réalisés auparavant pour la vulnérabilité des routes forestières et le présent ouvrage réside en l'utilisation d'un modèle spatialement explicite pour détecter les tronçons les plus susceptibles à une interruption. En revanche, d'autres paramètres sont pertinents pour améliorer le modèle de la vulnérabilité, citons comme exemple le temps de voyage et le confort de roulement.

Concernant le deuxième objectif de la présente étude, la détérioration des routes forestières par classe fonctionnelle, nous avons modélisé la détérioration en traitant le pourcentage de perte en surface de roulement (PPSR) comme variable réponse. Plusieurs facteurs de détérioration ont été calculés et intégrés dans notre modèle comme la classe fonctionnelle, l'âge de la route, le type de milieu (sec ou humide), le dépôt de surface, l'identifiant du tronçon et la pente. Le résultat affiche une courbe de la détérioration des routes forestières selon le PPSR en fonction de la classe fonctionnelle et au cours du temps. La pente ainsi que l'âge de la route associé à sa classe fonctionnelle présentent des facteurs décisifs dans la détérioration des routes forestières. Les résultats de ce modèle montrent un rythme de détérioration plus rapide pour les classes fonctionnelles inférieures que dans les classes fonctionnelles supérieures.

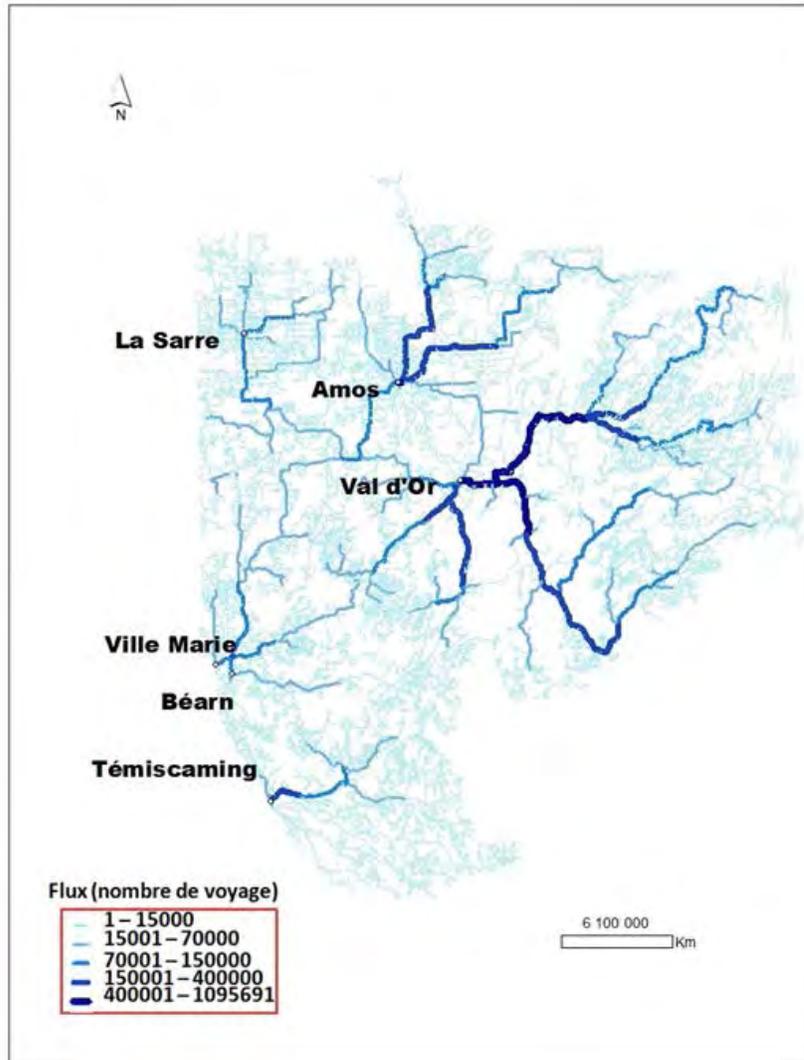
Cette analyse de la détérioration s'est basée sur le PPSR qui est une variable simple adéquate pour évaluer les routes forestières qui se caractérisent par le lien direct reliant les parcelles de coupe avec l'usine. En effet, avec la disponibilité de données LIDAR

et des images à haute résolution une telle estimation pourrait être réalisée aisément. Éventuellement avec l'insertion d'autres paramètres comme le flux (taux de fréquentation), les matériaux de construction et la vitesse de roulement, la modélisation de la détérioration pourrait être améliorée.

La vulnérabilité combinée avec la modélisation de détérioration des routes selon les classes fonctionnelles permettrait une meilleure anticipation de l'état des routes et faciliteraient sa gestion. Le fait que certains tronçons soient vulnérables à l'interruption de flux, leur détérioration pourrait aggraver la situation. La priorisation de l'entretien des routes est désormais possible grâce aux résultats de ce projet de recherche. En effet, notre projet contribue à garnir le coffre à outils de gestionnaires afin d'améliorer la planification stratégique des routes forestières via la mise en place d'un plan d'entretien.

ANNEXE A

SIMULATION DU FLUX DE TRANSPORT DE BOIS EN ABITIBI-
TÉMISCAMINGUE SELON LES QUATRE PREMIERS INVENTAIRES
ÉCOFORESTIERS



BIBLIOGRAPHIE

- Abeli, W.S., O. Meiludie. et R. Kachwele. 2000. Road alignment and gradient issues in the maintenance of logging roads in Tanzania. *International Journal of Forest Engineering*, 11: 22–29.
- Akay, A. E., O. Erdas., M. Reis. et A. Yuksel. 2008. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. *Building and Environment*, 43, 687–695.
- Alexakis, D. D., A. Agapiou., M. Tzouvaras., K. Themistocleous., K. Neocleous., S. Michaelides. et D.G. Hadjimitsis. 2014. Integrated use of GIS and remote sensing for monitoring landslides in transportation pavements: the case study of Paphos area in Cyprus. *Nat. Hazards* 72, 119–141.
- Anderson, A. E., et J. Nelson. 2004. Projecting vector-based road networks with a shortest path algorithm. *Canadian journal of forest research*, 34(7), 1444-1457.
- Arima, E.Y., T.R. Walker., G.S. Perzet et M. Caldas. 2005. Loggers and forest fragmentation: Behavioral models of road building in the Amazon basin. *Annals of the Association of American Geographers*, 95, (3), 525-541.
- Balijepalli, C. et O. Oppong 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.

- Bates, D., M. Maechler., B. Bolker et S. Walker. 2019. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67:1-48. Ressource en ligne (12/08/2019) : doi:10.18637/jss.v067.i01.
- Benítez-López, A., R. Alkemade et P.A. Verweij. 2010. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis. *Biological conservation*, 143(6), 1307-1316.
- Berdica, K. 2002. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transp. Policy* 9, 117–127.
- Bilby, R E., K. Sullivan. et S H. Duncan. 1989. The generation and fate of road-surface sediment in forested watersheds in southwestern Washington. *Forest Science* 35(2) : 453-468.
- Bjorndal, T., I. Herrero., A. Newman., C. Romero. et A. Weintraub. 2012. Operations research in the natural resource industry. *International Transactions in operational Research* 19(1-2): 39-62.
- Brodeur, M., J. Carrier., J.M. Durand., E. Fauteux et S. Fortin. 2002. Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples. Service de la qualité et des normes. Ressource en ligne (12/08/2019) : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0934906.pdf>.
- Brown, D., W. Liu et T.F. Henning. 2010. Identifying pavement deterioration by enhancing the definition of road roughness. Report 430. NZ Transport Agency, Wellington, New Zealand, 2010.
- Bostock, H.S. 1970. Physiographic regions of Canada. *Geology and economic minerals of Canada. Economie Geology Report* 1 : 11-30.

- Bourgeois, L., D.D. Kneeshaw., L. Imbeau., S. Brais., N., Bélanger et S. Yamasaki. 2007. How do Alberta's, Ontario's and Quebec's forest operation laws respect ecological sustainable forest management criteria in the boreal forest? *The Forestry Chronicle*, 2007, 83(1): 61-71.
- Bourgeois, L., D. Kneeshaw et G. Boisseau. 2005. Les routes forestières au Québec: Les impacts environnementaux, sociaux et économiques. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 6(2).
- Cai, X., Z. Wu. et J. Cheng. 2013. Using kernel density estimation to assess the spatial pattern of road density and its impact on landscape fragmentation. *International Journal of Geographical Information Science*, 27 (2), 222-230.
- Chapman, L.J., et M.K. Thomas. 1968. *The Climate of Northern Ontario; Climatological studies no.6, Meteorological Branch, Dept, of Transport, Toronto, 58.*
- Cherkassky, B.V., A.V. Goldberg. et T. Radzik. 1993. Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation. Technical Report 93-1480, Computer Science Department, Stanford University.
- Chung, W. et J. Sessions. 2001. Designing a forest road network using heuristic optimization techniques. Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings: "Appalachian Hardwoods: Managing Change" Snowshoe, July 15-18, 2001.
- Cornish, P. M. 2001. The effects of roading, harvesting and forest regeneration on streamwater turbidity levels in a moist eucalypt forest. *Forest Ecology and Management*, 152, 293–312.

- Coulter, E.D., J. Coakley. et J. Sessions. 2006a. The analytic hierarchy process : a tutorial for use in prioritizing forest road investments to minimize environmental effects. *International Journal of Forest Engineering*, 17, 51–70.
- Coulter, E.D., Sessions., J et M. G.Wing. 2006b. Scheduling forest road maintenance using the analytic hierarchy process and heuristics. *Silva Fennica*, 40(1), 143.
- Coffin, A.W. 2007. From roadkill to road ecology: a review of the ecological effects of roads. *Journal of transport Geography* 15(5) : 396-406.
- Côté, J.F. 2015. L'or vert du Québec. Ressources Mines et Industries. Ressource en ligne (12/08/2019) : http://www.dgr.ca/assets/documents/DGR_Ressources_Mines_industrie_publication_Oct2015.pdf.
- Coulombe, G., J. Huot., J. Arsenault., É. Bauce., J.-T. Bernard., A. Bouchard., M.-A. Liboiron et G. Szaraz. 2004. Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise (Rapport Coulombe). 2004. 307.
- Dallaire, N. 2013. Cadre de référence et démarche de priorisation du réseau des chemins multiusages en Abitibi-Témiscamingue. Ressource en ligne (13/05/2017) : http://www.conferenceregionale.ca/documents/files/rapport_cadre_refere_nce_demarche_priorisation_reseau_chemins_multiusages_region_mars2013.pdf.
- Dallaire, S. 2006. Effets des pratiques forestières sur l'habitat du poisson, Rapport d'étude réalisé pour la forêt modèle Crie de Waswanipi. Centre technologique des résidus industriels, Amos, Québec, 40.

- Danneyyrolles, V. 2016. Reconstitution de la composition des forêts préindustrielles du Témiscamingue (Québec) à partir des archives de l'arpentage primitif (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). Ressource en ligne (12/08/2019) : https://labdendro.uqar.ca/wpcontent/uploads/2015/02/Danneyyrolles_Victor.pdf.
- Dean, D. 1997. Finding optimal routes for networks of harvest site access roads using GIS-based techniques. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 11–22.
- Demir, M. 2007. Impacts, management and functional planning criterion of forest road network system in Turkey. *Transportation Research Part A*, 41, 56–68.
- D'Este, G.M. et M.A.P. Taylor. 2003. Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. In : *The Network Reliability of Transport: Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*. Emerald Group Publishing Limited, 2003. p. 23-44.
- Duncan, S. H., J.W., Ward et R.J Anderson. 1987. A method for assessing landslide potential as an aid in forest road placement. *Northwest Science*, 61(3), 152–159.
- Environnement et Changement climatique Canada. 2010. Ressource en ligne (12/08/2019) : http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html.
- Erath, A., J. Birdsall., K.W. Axhausen et R. Hajdin. 2009. Vulnerability assessment methodology for Swiss road network. *Transportation Research Record*, 2137,118–126.

- Esri 2016. Ressource en ligne (12/11/2019) : <https://support.esri.com/en/Products/Desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-5>.
- Forman, R.T.T. et L.E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual review of ecology and systematics* 29.1 : 207-231.
- Gauthier, S., M.-A. Vaillancourt, A. Leduc., L. De Grandpré., D. Kneeshaw., H. Morin., P. Drapeau et Y. Bergeron. 2008. Aménagement écosystémique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec ISBN 9782760519596.
- Goycoolea, M., A. Murray., J.P. Vielma et A. Weintraub. 2009. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. *For.Sci.* 55(2): 149–165
- Grigolato, S., M. Pellegrini et R. Cavalli. 2013. Temporal analysis of the traffic loads on forest road networks. *iForest-Biogeosci Forestry.* 6:255–261
- Groupe DDM. 2016. Enquête 2013-2014 sur les coûts d'opération et les revenus liés au bois d'œuvre de l'industrie forestière du Québec. Ressource en ligne (12/08/2019) : https://bmmb.gouv.qc.ca/media/34825/enqu_te_quinquennale_2014_rapp._final__volets_i_et_ii__2016-03-18.pdf.
- Gucinski, H. 2001. Forest roads: a synthesis of scientific information. Vol. 509. Diane Publishing.
- Gumus, S. 2009. Constitution of the forest road evaluation form for Turkish forestry. *African Journal of Biotechnology*, 8(20).

- Gupta, A., P. Kumar et R. Rastogi. 2011. Pavement deterioration and maintenance model for low volume roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4), 195-202.
- Havimo, M., P. Mönkönen., E. Lopatin et B. Dahlin. 2017. Optimising forest road planning to maximise the mobilisation of wood biomass resources in Northwest Russia. *Biofuels*, 8(4), 501-514.
- Heidari, M.J., A. Najafi et S.J. Alavi. 2016. The Review of Protrusion as an Important Factor on Forest Road Deterioration. *International Conference on Research in Engineering Science and Technology*, At Istanbul, Volume: 1.
- Holmgren, Å. 2006. Vulnerability analysis of electric power delivery networks. Thèse de doctorat en analyse de la sécurité, avril 2006. KTH Institut royal de technologie de Stockholm. Département des transports et de l'économie. 32. Ressource en ligne (12/08/2019) : <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:7703/FULLTEXT01.pdf>.
- Jenelius, E. 2009. Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, 17(3) : 234-244.
- Jenelius, E. et L.-G. Mattsson 2015. Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, environment and urban systems* 49: 136-147.
- Jenelius, E. et L.-G. Mattsson 2008. The vulnerability of road networks under area-covering disruptions. *Inform's annual meeting*, Washington DC, USA : 12-15.

- Jenelius, E. et L.-G. Mattsson 2012. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study. *Transportation research part A: policy and practice*, 46(5) : 746-760.
- Kirby, M., W. Hager et P. Wong. 1986. Simultaneous planning of wildland management and transportation alternatives. *Management Science and Studies*, 21: 371–387.
- Knoop, V., H. Van Zuylen et S. Hoogendoorn. 2008. The influence of spillback modelling when assessing consequences of blockings in a road network. *European Journal of Transportation and Infrastructure Research*, 8, 287–300.
- Lab-STICC. 2017. Ressource en ligne (12/11/2019) :<http://orbisgis.org/>.
- Lacombe, P. 2015. Caractérisation de l'état et de la durabilité des traverses de cours d'eau sur les chemins forestiers à faible fréquentation. Proposé de mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 17 p.
- Latora, V. et M. Marchiori. 2001. Efficient behavior of small-world networks. *Physical review letters*, 87(19), 198701.
- Latora, V. et M. Marchiori. 2005. Vulnerability and protection of infrastructure networks. *Phys. Rev. E* 71, 015103(R).
- Latrémouille, I. 2012. Guide des saines pratiques d'entretien des chemins forestiers dans les zecs. Chapitre 3 : 10-13. Ressource en ligne (12/08/2019) : <https://www.reseazec.com/system/resources/W1siZiIsIjIwMTMvMDgvMzAvMTVfMzdfNDFFNDQxX0d1aWR1X2NoZW1pb196ZW1ucGRmI1d/Guide%20chemin%20zec.pdf>.

- Laurance, W.F., A. Peletier-Jellema., B. Geenen., H. Koster., P. Verweij., P. Van Dijck., T.E. Lovejoy., J. Schleicher et M. Van Kuijk. 2015. Reducing the global environmental impacts of rapid infrastructure expansion. *Current Biology*. 2015 Mar 30;25(7) : R259-62.
- Lessard-Juneau, G. 2011. Plan directeur d'entretien de chemins forestiers. Territoire de la MRC du Témiscamingue. Ressource en ligne (12/08/2019) : <http://www.mrcstemiscamingue.org/wpcontent/uploads/2015/11/cheminsforestiers.pdf>.
- Luathep, P., A. Sumalee., H.W. Ho et F. Kurauchi. 2011. Large-scale road network vulnerability analysis: A sensitivity analysis based approach. *Transportation*, 38, 799–817.
- Luce, C.H. 1997. Effectiveness of road ripping in restoring infiltration capacity of roads. *Restoration Ecol.* 5, 265–270.
- Martin, A.M., P.M.O. Owende., N.M. Holden., S.M. Ward et M.J. O'Mahony. 2001. Designation of timber extraction routes in a GIS using road maintenance cost 374 data. *Journal of Forest Products* 51(10): 32-38.
- MFFP. 2018. Plan d'aménagement forestier intégré tactique 2018-2023 ministère des forêts, de la faune et des parcs région de l'Abitibi-Témiscamingue. Unité d'aménagement 081-51. Unité d'aménagement 081-52. Ressource en ligne (12/08/2019) : https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/PL_PAFIT_2018-2023_R08_081-52.pdf. https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/PL_PAFIT_2018-2023_R08_081-51.pdf.
- Murray, A.T. 1998. Route planning for harvest site access. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 1084–1087.

- Minoux, M. 1975. Plus court chemin avec contraintes : Algorithmes et applications. *Annales Des Télécommunications*. 30 : 383–394.
- Mönkkönen, P. 2008. Planning of forest roads, costs and profitability in the North-West Russia. University of Helsinki.
- Morin, L. 2014 : Résultats finaux de l'analyse des possibilités forestières période 2013-2018. Unité d'aménagement 081-51. Version 3.0 : 6-9. Bureau du forestier en chef. Ressource en ligne (12/08/2019) : https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/06/08151_Rapport_determination_v3.0.pdf.
- Naderializadeh, N. et K.A. Crowe. 2018. The effect of the density of candidate roads on solutions in tactical forest planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(6), 679-688.
- Nevečerel, H., T. Pentek., D. Pičman et I. Stankić. 2007. Traffic load of forest roads as a criterion for their categorization–GIS analysis. *Croatian J Forest Eng*. 28: 27–38.
- Nivedya, M.K., R.B. Mallick., J.M. Jacobs et J.S. Daniel. 2018. Economics of making roads resilient to climate change: use of discounted cash flow and real options analysis (No. 18-01216).
- O'hanley, J.R. et D. Tomberlin. 2005. Optimizing the removal of small fish passage barriers. *Environmental Modeling and Assessment*, 10(2), 85-98.
- Pelletier, L. 2016. Mise à jour des possibilités forestières UA081-51/ UA081-52. Ressource en ligne (12/08/2019) : <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/2013-2018/revue-externe/>.

- Picard, N., L. Gazull et V. Freycon. 2006. Finding optimal routes for harvesting tree access. *International journal of forest engineering*, 17(2), 35-50.
- Postgis 2017. Ressource en ligne (12/11/2019):<https://postgis.net/2019/03/11/postgis-patches/>.
- PostgreSQL 2017. Ressource en ligne (12/11/2019) : <https://www.postgresql.org/>.
- Potočnik, I., T. Yoshioka., Y. Miyamoto., H. Igarashi et H. Sakai. 2005. Maintenance of forest road network by natural forest management in Tokyo University Forest in Hokkaido. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 26(2), 71-78.
- Qiang, Q., et A. Nagurney. 2008. A unified network performance measure with importance identification and the ranking of network components. *Optimization Letters*, 2(1), 127-142.
- Salmon, D. 2016. Ressources et industries forestières du Québec. Portrait statistique. Édition 2016. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Direction du développement de l'industrie des produits du bois. Ressource en ligne (12/08/2019): <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/portrait-statistique-2016.pdf>.
- Sarrazin, F., L. LeBel et N. Lehoux. 2018. Analyzing the impact of implementing a logistics center for a complex forest network. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(2), 179-189.
- Scott, D. M., D. C. Novak., L. Aultman-Hall. et F. Guo. 2006. Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the

- performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14, 215-227.
- Shan, Y., P. Bettinger., C. J. Cieszewski. et R. T. Li. 2009. Trends in spatial forest planning. *Math. Comput. For. Nat. Resour. Sci.* 1(2): 86–112.
- Sheridan, GJ., P.J. Noske., R.K. Whipp et N. Wijesinghe. 2006. The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads. *hydrological processes*. 20: 1683-1699
- Shreve, R.L. 1967. Infinite topologically random channel networks. *Journal of Geology* 75, 178-186.
- Song, M., et D. Civco. 2004. Road extraction using SVM and image segmentation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (12), 1365-1371.
- Svenson, G., et D. Fjeld. 2017. The impact of road geometry, surface roughness and truck weight on operating speed of logging trucks. *Scandinavian journal of forest research*, 32(6), 515-527.
- Underhill, J.E. et P.G. Angold. 2000. Effects of roads on wildlife in an intensively modified landscape. *Environmental Reviews*, 8(1): 21-39.
- Weintraub, A., R.L Church., A.T. Murray et M. Guignard. 2000. Forest management models and combinatorial algorithms: analysis of state of the art. *annals of operations research*. 96: 271-85.

- Xie, F., et Levinson, D. 2007. Measuring the structure of road networks. *Geographical analysis*, 39(3), 336-356.
- Zhang, Q., J. Wang, X Peng., P. Gong et P. Shi. 2002. Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(15), 3057-3078.
- Zobel, D.B., L.E. Roth et G.M. Hawk. 1985. Ecology, pathology, and management of Port-Orford cedar (*Chamaecyparis lawsoniana*). USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Gen. Tech. Rep. PNW-184