

Rapport technique

PROJET N° 3323-2225-REX-2206-6

**Réduire les dommages aux arbres
résiduels en coupe partielle :
diagnostic des causes critiques et
solutions d'atténuation**

Résultats des analyses

SEPTEMBRE 2026

PAR Daniel Gouge, ing.f., M. Sc.
Gilles Joannis, biol., Ph. D.
Donald Blouin, ing.f., M. Sc.

PRÉSENTÉ À Direction de la recherche forestière du ministère des
Ressources naturelles et des Forêts
Lucas-Gabriel Serban, ing.f., Ph. D.

Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers
du ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Pierre Couture, ing.f.

**Ressources naturelles
et Forêts**

Québec 



MOTS-CLÉS

Procédés de récolte, foresterie, blessures, tiges résiduelles, aménagement forestier, sylviculture, modélisation statistique, intelligence artificielle

RÉFÉRENCE À CITER :

Gouge, D., Joannis, G., Blouin, D. (2026). Réduire les dommages aux arbres résiduels en coupe partielle : diagnostic des causes critiques et solutions d'atténuation. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 24-1059. 44 pages + 4 annexes.



Bénéficiaire du projet

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts

Direction de la recherche forestière

Lucas-Gabriel Serban, ing.f., Ph. D.

Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers

Pierre Couture, ing.f.

Promoteur du projet

Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.

Daniel Gouge, ing.f., M. Sc.

Gilles Joannis, biol., Ph. D.

Donald Blouin, ing.f., M. Sc.

Partenaires du projet

Groupe forestier de Témiscouata (Bas-Saint-Laurent)

Gaston Cellard (Gaspésie, Bas-Saint-Laurent)

Chantiers Chibougamau (Témiscamingue)

Groupe Lebel (Bas-Saint-Laurent)

Groupe forestier Métis-Neigette (Bas-Saint-Laurent)

Coopérative de gestion forestière des Appalaches (Chaudière-Appalaches)

Forespect (Outaouais)

Lauzon (Outaouais)

Domtar (Estrie)

Forex Langlois (Mauricie)



Table des matières

Bénéficiaire du projet	III
Promoteur du projet	III
Partenaires du projet	III
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations et des sigles	X
Remerciements	XI
Résumé	XII
État des connaissances	1
Objectifs	2
1. Méthodes	3
1.1. Territoire à l'étude.....	3
1.2. Préparation des bases de données.....	5
1.3. Analyse des données.....	6
2. Limites des données	9
2.1. Effet aléatoire.....	9
2.2. Données industrielles	9
2.3. Déclaration des blessures différentes selon la région.....	9
2.4. Déplacement de la machinerie	9
3. Résultats	10
3.1. Effet régional	10
3.2. Résultats à l'échelle des secteurs d'intervention provinciaux.....	10
3.3. Résultats à l'échelle de la tige	19
3.4. Résultats de l'analyse des déplacements de la machinerie	23
4. Discussion sur les conditions de risque de blessures	26
4.1. Conditions temporelles	26
4.2. Caractéristiques du peuplement forestier	27
4.3. Planification et suivi des opérations forestières	28



4.4.	Réalisation des opérations forestières.....	29
4.5.	Facteur humain.....	31
5.	Recommandations opérationnelles	32
5.1.	Prioriser la récolte d'hiver  	32
5.2.	Prioriser la récolte de jour 	32
5.3.	Devancement de la coupe finale 	32
5.4.	Abattage directionnel et angle par rapport au sentier  	33
5.5.	Positionnement des empilements 	33
5.6.	Coupe en hauteur 	34
5.7.	Ébranchage sur place 	35
5.8.	Arbre protecteur dans les courbes de sentier  	35
5.9.	Répartition de la charge 	36
5.10.	Améliorer la visibilité 	36
5.11.	Récolte des grosses tiges lors de la première passe 	36
5.12.	Martelage adapté aux contraintes opérationnelles 	36
5.13.	Espacement des sentiers de débardage 	37
5.14.	Sentiers rectilignes  	37
5.15.	Patrons de coupe offrant plus de marge de manœuvre  	37
5.16.	Adaptation des critères d'évaluation  	37
5.17.	Respect du taux de récolte 	38
5.18.	Suivi rapproché et formation des opérateurs 	38
5.19.	Quarts de travail 	38
5.20.	Poursuivre l'étude en peuplements résineux  	38
6.	Résumé des sources de blessures et recommandations	39
	Références.....	42
	Annexes.....	45
	Annexe A. Critères d'évaluation d'une blessure lors des suivis de conformités	45



Annexe B. Exemple de critères d'évaluation après traitement dans une coupe progressive irrégulière.....	47
Annexe C. Données disponibles à l'échelle du secteur d'intervention et de la placette.....	48
Annexe D. Types de coupe et procédés de récolte	50

Symboles pour indiquer la source d'information qui appuie les résultats



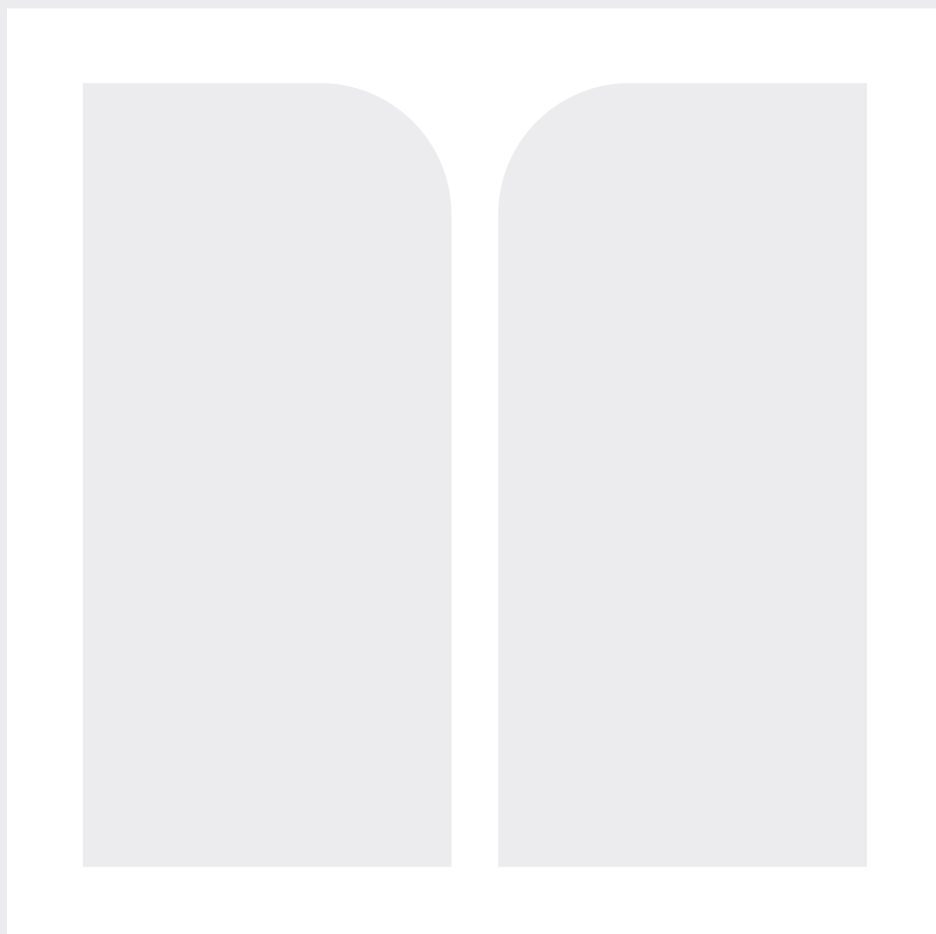
– Soutenues par les résultats du projet



– Soutenues par les observations d'industriels



– Soutenues par la littérature scientifique





Liste des figures

Figure 1. Localisation des placettes de suivi d'après coupe analysées dans cette étude, selon les domaines bioclimatiques du Québec.....	3
Figure 2. Localisation des unités d'aménagement et des secteurs d'intervention ayant servi aux analyses....	4
Figure 3. Bases de données analysées (bleu) et données brutes (jaune) ayant servi à constituer les bases de données présentées dans la section <i>Résultats</i>	5
Figure 4. Exemple d'un bouleau jaune présentant une blessure de pied et une blessure de racine qui doivent être déclarées selon les critères d'évaluation du MRNF (2024).	6
Figure 5. Processus de préparation des données et d'analyse des données par apprentissage automatisé..	7
Figure 6. Diagramme sous forme de boîte à moustaches représentant la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée selon le traitement appliqué.	11
Figure 7. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) prélevée et la proportion de surface terrière résiduelle blessée.	12
Figure 8. Relation entre la surface terrière (ST) feuillue prélevée et la proportion de surface terrière blessée, représentée par une courbe de LOESS.	13
Figure 9. Diagramme sous forme de boîte à moustaches représentant la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée, en fonction du procédé de récolte.....	14
Figure 10. Surface terrière des tiges résiduelles blessées selon 4 combinaisons de procédés de récolte et de saison de début des opérations de récolte de bois.....	15
Figure 11. Diagramme sous forme de boîte à moustaches représentant la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée selon la saison de début des travaux de récolte.	16
Figure 12. Comparaison de la densité et des contraintes de pente, d'érosion et de sensibilité dans des secteurs d'intervention respectant ou dépassant le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée imposé par le MRNF.....	19
Figure 13. Proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des tiges résiduelles.	20
Figure 14. Proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des tiges résiduelles en ne considérant pas les tiges renversées comme blessées.....	21
Figure 15. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée et la distance entre le centre d'une placette de suivi des opérations après coupe et le sentier d'abattage le plus proche.	23
Figure 16. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée et la proportion de superficie occupée par les sentiers d'abattage dans chaque secteur d'intervention (SI).	24
Figure 17. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée et la sinuosité moyenne des sentiers d'abattage dans chaque secteur d'intervention (SI). Chaque point représente l'un des 307 secteurs d'intervention étudiés. La zone bleue correspond à l'intervalle de confiance du modèle linéaire.....	25
Figure 18. Exemple de blessure de pied et de racine sur un BOJ.....	30



Figure 19. Illustration du patron de coupe en chevron.....	33
Figure 20. Illustration du positionnement de biais des tiges coupées afin de faciliter leur transport jusqu'au chemin.	33
Figure 21. Principe de coupe en hauteur.	34
Figure 22. Schéma présentant un arbre protecteur à l'intérieur d'une courbe de sentier de débardage. Photographie prise par le CERFO (2022).	35
Figure 23. Illustration de la répartition de la charge sur une plus grande superficie, avec et sans chenilles.	36



Liste des tableaux

Tableau 1. Proportion moyenne de la surface terrière (ST) résiduelle blessée et écart-type en fonction de la saison de début des travaux de récolte forestière.	16
Tableau 2. Comparaison de la répartition des traitements utilisés dans les secteurs d'intervention respectant ou dépassant le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée du MRNF.	17
Tableau 3. Comparaison de la répartition des procédés de récolte utilisés dans les secteurs d'intervention respectant ou dépassant le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée du MRNF.	18
Tableau 4. Comparaison de la répartition des saisons de début des opérations dans les secteurs d'intervention qui respectent ou non le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée du MRNF.	18
Tableau 5. Proportion de surface terrière blessée pour les essences les plus présentes dans les placettes-échantillons de l'étude.	22
Tableau 6. Proportion des types de blessures observés sur les feuillus et les résineux dans les placettes analysées.	22
Tableau 7. Résumé des principales sources de blessures et des recommandations qui leur sont associées.	39



Liste des abréviations et des sigles

DAEF : Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers

DHP : Diamètre à hauteur de poitrine

DGFor : Direction de la gestion des forêts

DOR : Diamètre optimal de rendement

DRF : Direction de la recherche forestière

n : Nombre de données ou nombre de lignes dans la base de données analysée

MRNF : Ministère des Ressources naturelles et des Forêts

PE : Placette-échantillon

RATF : Rapport annuel technique et financier

SI : Secteur d'intervention (superficie ciblée pour la coupe)

ST : Surface terrière

TWI : *Topographic Wetness Index* (indice d'humidité topographique)

UA : Unité d'aménagement



Remerciements

Nous tenons à remercier nos partenaires industriels et gouvernementaux pour leurs précieux conseils ainsi que pour les données qu'ils ont mises à notre disposition. Leur contribution et leur étroite collaboration ont été essentielles à la réalisation de ce projet.

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts

Groupe forestier de Témiscouata (Bas-Saint-Laurent)

Gaston Cellard (Gaspésie, Bas-Saint-Laurent)

Chantiers Chibougamau (Témiscamingue)

Groupe Lebel (Bas-Saint-Laurent)

Groupe forestier Métis-Neigette (Bas-Saint-Laurent)

Coopérative de gestion forestière des Appalaches (Chaudière-Appalaches)

Forespect (Outaouais)

Lauzon (Outaouais)

Domtar (Estrie)

Forex Langlois (Mauricie)

Nous remercions particulièrement : Luca Serban; Alexandre Colgan; Jean-François Caissie; Renaud Dufort-Labbé; Charles St. Julien; Yannick Brisson; Nikita Touchette; Camille D'Amours Rousseau; Antoine Breton; Martin Béland; Robin Leggett; Dominic Lavoie; François Godin; Alexandre Veilleux; Loydy Brousseau; François Guillemette; Nadia Michaud et Éric Provost pour avoir fourni des données essentielles au projet et/ou pour leur participation aux discussions.



Résumé

En forêt feuillue et mixte québécoise, les coupes partielles constituent un outil essentiel de l'aménagement écosystémique pour favoriser la régénération des essences tolérantes à l'ombre et atteindre des cibles de structure irrégulière. Toutefois, l'utilisation de procédés de récolte mécanisés dans ces coupes entraîne fréquemment des blessures aux tiges résiduelles. Ces blessures peuvent favoriser l'entrée d'agents de dégradation et réduire la vigueur, la qualité ainsi que l'accroissement en volume des tiges d'avenir à moyen et long terme. La limitation des blessures après coupe représente ainsi un enjeu majeur pour l'atteinte des objectifs sylvicoles et pour le maintien du potentiel de productivité de la forêt québécoise à long terme. Dans ce contexte, l'objectif principal du projet est d'identifier, à l'échelle provinciale, les principaux facteurs et conditions qui influencent la proportion de tiges résiduelles blessées après coupe dans les peuplements feuillus et mixtes traités par coupes partielles. Plus précisément, l'étude vise à déterminer les sources de blessures les plus déterminantes, et à proposer des modalités opérationnelles permettant de minimiser les impacts sur les peuplements résiduels. L'approche retenue combine des analyses statistiques, notamment des méthodes d'apprentissage automatique et des modèles à effets mixtes, ainsi qu'une interprétation des résultats appuyée par des discussions avec les partenaires industriels ayant une expertise terrain.

Les analyses et les échanges avec les partenaires ont mis en évidence que les blessures aux arbres résultent d'une combinaison de facteurs interdépendants et que des variations régionales sont clairement présentes. Parmi les principales sources discutées figurent l'intensité de la récolte, notamment le pourcentage de surface terrière récoltée, le procédé de récolte utilisé (bois long ou bois court), la saison de récolte ainsi que le rôle central du débardage. Les caractéristiques du terrain, telles que la présence de blocs rocheux et de grosses tiges feuillues à houppier développé, la proportion de petites tiges marchandes, la densité de la régénération et l'obstruction visuelle, augmentent la difficulté des opérations forestières ainsi que les risques de frottement ou d'accrochage des tiges résiduelles. La saison de récolte exerce également une forte influence sur la fréquence et l'étendue des dommages, les opérations hivernales étant généralement associées à des impacts moindres. D'autres facteurs, comme les critères d'évaluation, l'encadrement du martelage, l'expérience des opérateurs ainsi que l'espacement et la superficie occupée par des sentiers de débardage, ont été identifiés comme des éléments clés contribuant aux dommages observés.

À la lumière de ces constats, plusieurs recommandations opérationnelles ont été formulées afin de réduire les blessures aux tiges résiduelles. Celles-ci incluent notamment la priorisation des récoltes hivernales lorsque les conditions de terrain sont difficiles, le respect des taux de récolte prescrits, l'espacement adéquat des sentiers de débardage en favorisant des tracés aussi rectilignes possible, ainsi que la récolte des grosses tiges dès les premières passes en coupe progressive. Le projet souligne également l'importance de considérer davantage les contraintes opérationnelles lors du martelage, d'assurer un suivi rapproché des travaux en cours d'opération et de confier les interventions les plus complexes à des opérateurs expérimentés. Par ailleurs, les patrons de récolte imposés ainsi que les critères de prescription doivent être mieux adaptés à la réalité terrain lorsque les contraintes opérationnelles sont nombreuses. Ensemble, ces recommandations visent à soutenir une planification plus adaptée aux réalités opérationnelles des coupes partielles pour maintenir la qualité et la productivité des tiges résiduelles qui formeront la forêt du futur.



État des connaissances

En forêt publique québécoise, la plupart des récoltes dans les forêts à feuillus tolérants et semi-tolérants sont effectuées par des coupes partielles, telles que les éclaircies commerciales, les coupes progressives, les coupes progressives irrégulières et les coupes de jardinage. Ces types de coupe permettent d'atteindre des cibles de composition spécifiques fixées par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF), qui sont établies conformément au principe d'aménagement écosystémique (Danneynrolles *et al.*, 2020). Ces interventions sont réalisées presque exclusivement à l'aide de procédés de récolte mécanisés.

Depuis 1945, la récolte mécanisée est devenue progressivement le mode de récolte dominant dans presque toutes les régions du Québec (Silversides, 1984). Bien que la sylviculture mécanisée permette d'atténuer l'enjeu du manque de main-d'œuvre et d'augmenter la productivité de récolte (Ramantswana *et al.*, 2020), celle-ci peut augmenter les risques de blessures (Proto *et al.*, 2026), qui entraînent la pourriture du bois et la perte de volume exploitable sur une période de 15 à 20 ans. Elle peut également nuire à la régénération des tiges d'avenir qui répondront aux besoins futurs de la population. Les blessures sont un enjeu considérable pour la rentabilité des récoltes futures, mais aussi pour le maintien d'un couvert résiduel essentiel à la biodiversité et à la régénération des essences tolérantes à l'ombre. Au Québec, les industriels forestiers sont tenus de respecter un seuil maximal de surface terrière résiduelle blessée, qui se situe autour de 10 %. Ce seuil est évalué en fonction de divers critères qui considèrent les blessures de pied, de racine et de houppier (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2024).

Les études sur la sylviculture mécanisée des deux dernières décennies ont démontré qu'il faut tenir compte de plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la fréquence des tiges blessées après intervention. Les principales sources de blessures ciblées par Kizha *et al.* (2021), Lessard *et al.* (2021) et Proto *et al.* (2026) sont :

1. le procédé de récolte — bois long et bois court;
2. le design des sentiers de débardage et leur planification préalable;
3. l'équipement utilisé — abatteuse et débardeur/porteur;
4. le type de coupe partielle;
5. la saison de récolte;
6. le type de forêt — densité et hauteur des arbres présents;
7. les conditions du site, qui occasionnent des contraintes aux opérations — drainage, pente, obstacles;
8. l'expérience de l'équipe d'abattage.

Différentes mesures pour limiter les blessures causées par la sylviculture mécanisée ont été identifiées par les études de Kizha *et al.* (2021) en forêt mixte et résineuse dans l'état du Maine, aux États-Unis. Plusieurs de ces recommandations ne s'appliquent pas directement au contexte d'opérations forestières en forêt mixte et feuillue au Québec. De plus, les connaissances concernant l'impact spécifique des différents procédés de récolte, des caractéristiques des sentiers de débardage, des conditions écologiques de site, du type de coupe et des saisons de réalisation restent limitées au Québec. En effet, les études quantitatives sur les dommages aux peuplements résiduels en contexte québécois sont encore peu nombreuses et difficiles à réaliser à grande échelle. Les conditions expérimentales sont difficiles à contrôler et les données recueillies lors des opérations ne sont pas accessibles au grand public. Ce projet permet de répondre à ce manque en combinant les données disponibles à celles fournies par des collaborateurs industriels partout dans la province afin de les analyser. L'identification des principales sources de blessures à l'échelle provinciale permettra de cibler plus efficacement les interventions susceptibles de réduire les dommages causés aux peuplements résiduels.



Objectifs

Cette étude repose sur une collaboration étroite avec les industriels forestiers afin d'identifier les principales sources de blessures et de proposer des solutions opérationnelles. Les recommandations formulées sont donc fondées sur la littérature scientifique, les analyses statistiques ainsi que l'interprétation des résultats lors de discussions avec le MRNF et les industriels participants.

1.

Identifier les paramètres d'intérêt* des peuplements forestiers feuillus ou mixtes pour évaluer l'impact de la récolte sur les peuplements résiduels.

2.

Prédire statistiquement la quantité de blessures en fonction des procédés de récolte dans les coupes progressives irrégulières réalisées dans des peuplements à feuillus tolérants.

3.

Établir la liste de conditions** qui minimisent les impacts pour guider le choix du procédé de récolte le plus approprié.

4.

Développer des modalités opérationnelles qui minimisent les impacts sur les peuplements résiduels en fonction du procédé de récolte.

**Par paramètres d'intérêt, on entend des variables dendrométriques, écologiques et opérationnelles qui peuvent influencer la fréquence des risques de blessures aux arbres résiduels.*

***Par conditions, on entend des combinaisons de paramètres d'intérêt.*



1. Méthodes

1.1. Territoire à l'étude

Le territoire d'étude s'étend sur une vaste partie du territoire forestier feuillu et mixte de la province de Québec, au Canada. Les données utilisées proviennent principalement de la forêt publique des domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune et de l'érablière à bouleau jaune (Figure 1). Les peuplements forestiers feuillus et mixtes étudiés ont tous moins de 75 % de canopée résineuse et ont tous été traités par une coupe partielle de 2018 à 2023. Des données provenant des placettes-échantillon (PE) de suivi d'intervention ainsi que des données à l'échelle du secteur d'intervention (SI) ont été reçues du MRNF et des industriels partenaires au projet. L'emplacement des PE et des SI se recoupait partiellement, c'est-à-dire qu'un peu plus de la moitié des PE se retrouvaient dans des SI dont les données étaient disponibles pour le projet.

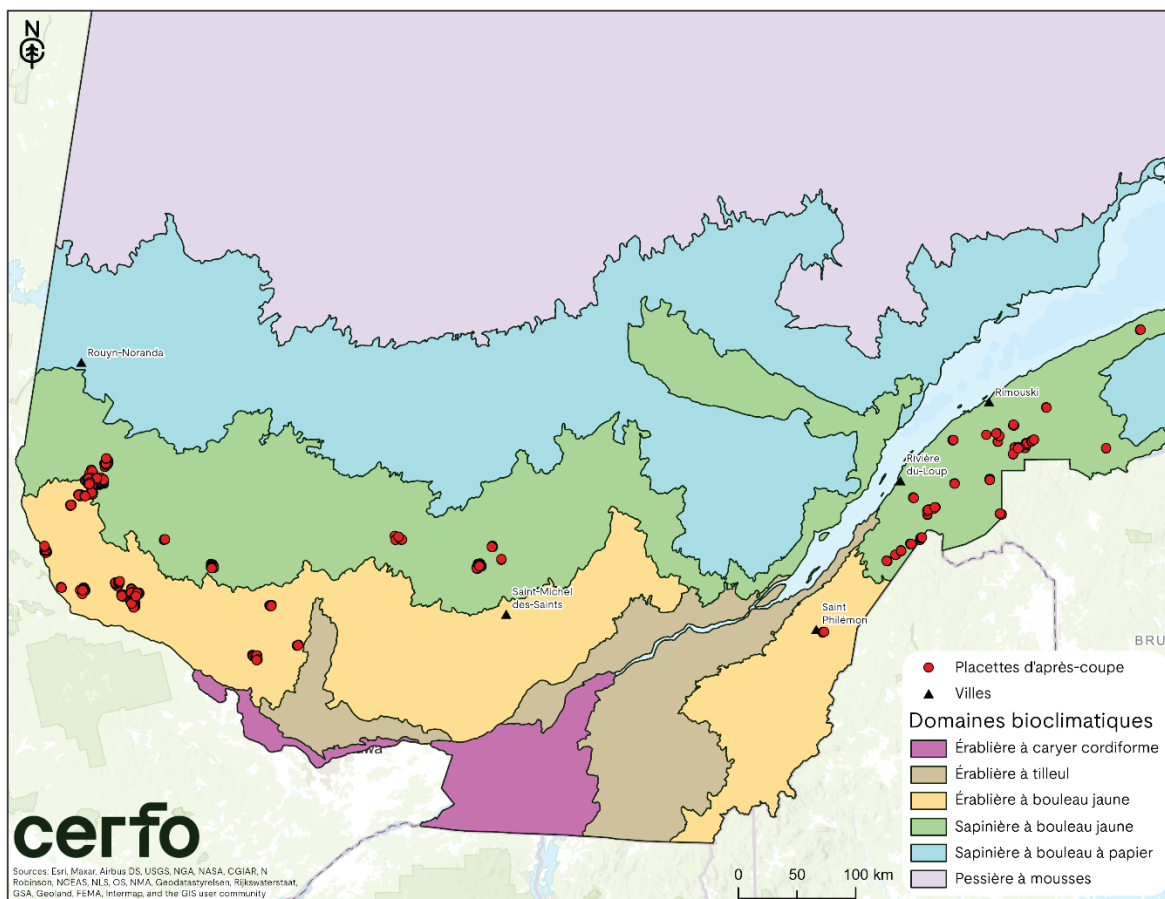


Figure 1. Localisation des placettes de suivi d'après coupe analysées dans cette étude, selon les domaines bioclimatiques du Québec.



1.1.1. Portrait des secteurs d'intervention étudiés

Les données utilisées proviennent de secteurs d'intervention traités en coupe partielle, répartis dans plusieurs unités d'aménagement (UA) du Québec (**Figure 2**).

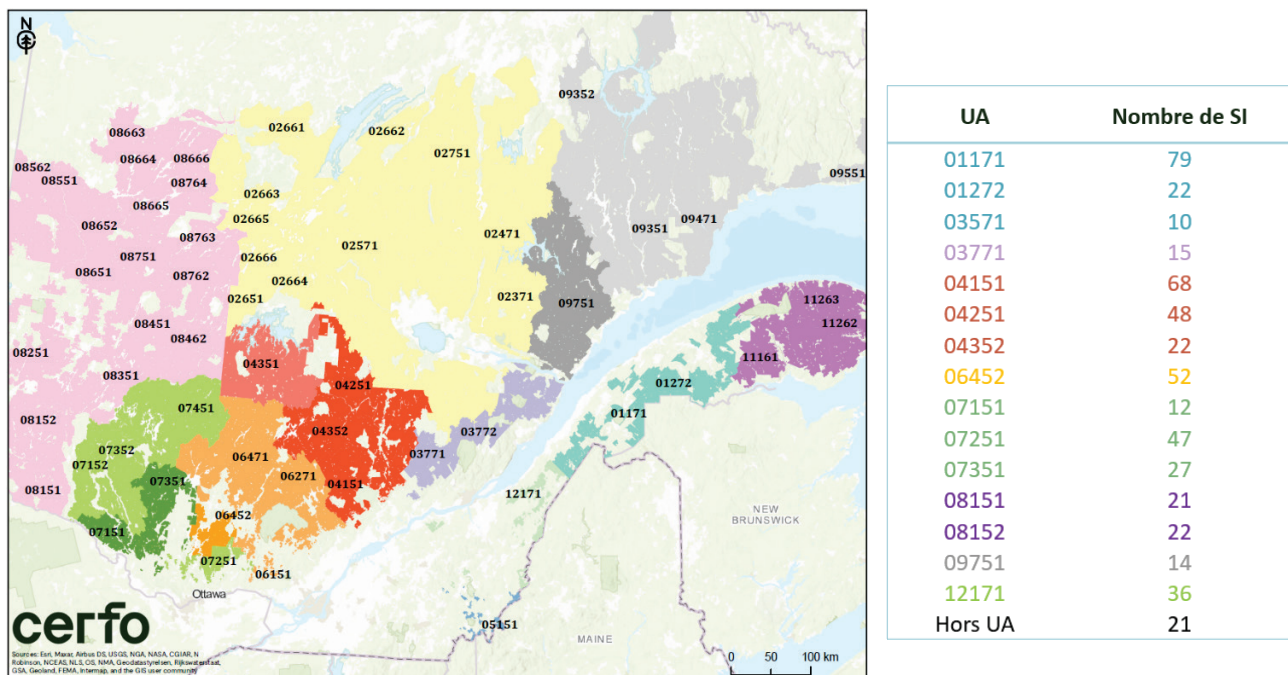


Figure 2. Localisation des unités d'aménagement et des secteurs d'intervention ayant servi aux analyses.

Les types de coupe partielle étudiés sont la coupe jardinée (CJ), la coupe progressive irrégulière à couvert permanent (CPI_CP) et la coupe progressive irrégulière à régénération lente (CPI_RL). Le taux de récolte moyen en surface terrière se situe autour de 32 % en CJ, 36 % en CPI_CP et de 40 % en CPI_RL. Environ 46 % des SI ont été traités en CPI_RL, contre 42 % en CPI_CP et 12 % en CJ.

Les procédés de récolte comparés dans cette étude sont le procédé par bois long et par bois court. Le procédé par bois long implique une abatteuse groupeuse, une débusqueuse et une ébrancheuse, alors que le procédé par bois court implique plutôt une abatteuse multifonctionnelle et un porteur¹.

À l'intérieur des secteurs d'intervention disponibles, seule la portion en forêt feuillue ou mixte a été considérée dans les analyses. Les superficies feuillues et mixtes en coupe partielle ont en moyenne 38 ha par secteur d'intervention. Le type de couvert le plus fréquent a été le mixte, dominant 79 % des secteurs d'intervention, par rapport aux secteurs feuillus, qui dominaient seulement les 21 % restant.

¹ L'annexe D présente plus en détail les procédés de récolte et les types de coupe étudiés.



1.2. Préparation des bases de données

Trois types de données brutes ont été utilisés pour constituer les cinq bases de données analysées dans le cadre de cette étude :

1. Des tiges compilées par placettes-échantillons après coupe au prisme, déclarée comme blessées ou non;
2. Des compilations d'inventaire après coupe réalisées à l'échelle du secteur d'intervention;
3. Des suivis de déplacement de machinerie (*tracking*) à l'échelle du secteur d'intervention.

Les différentes données ont été fournies par la Direction de la recherche forestière (DRF) et les industriels forestiers des différentes unités d'aménagement mentionnées ci-dessus. Certaines informations ont également pu être recueillies à partir des rapports d'activités techniques et financiers de 2018 à 2023 disponibles sur le site de Données Québec. La figure 3 présente globalement les données qui ont pu être analysées dans cette étude.

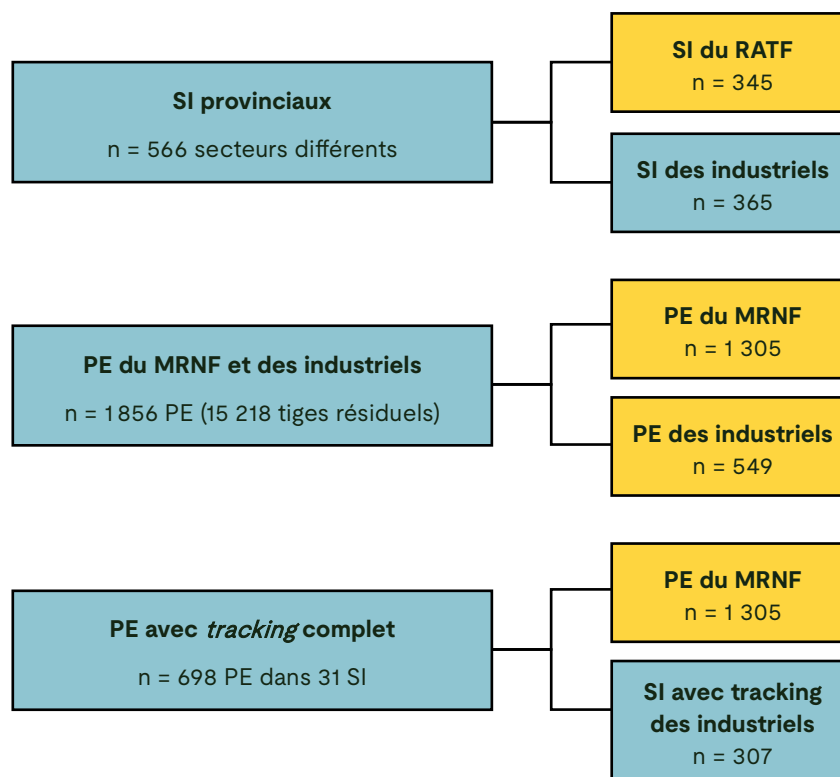


Figure 3. Bases de données analysées (bleu) et données brutes (jaune) ayant servi à constituer les bases de données présentées dans la section *Résultats*. La valeur suivie du symbole « n » représente le nombre de données disponibles.

Pour chaque base de données illustrée ci-dessus, les données retenues sont fournies dans l'annexe C. Les variables qui ne figurent pas dans les résultats ont eu des effets importants sur les blessures des tiges résiduelles. Bien que le nombre total de données soit indiqué par le symbole « n » dans la figure 3, certaines variables comportaient des données manquantes, par exemple la surface terrière feuillue et résineuse récoltée dans un SI. C'est pourquoi les valeurs de n présentées dans les résultats peuvent être inférieures à celles indiquées à la figure 3.



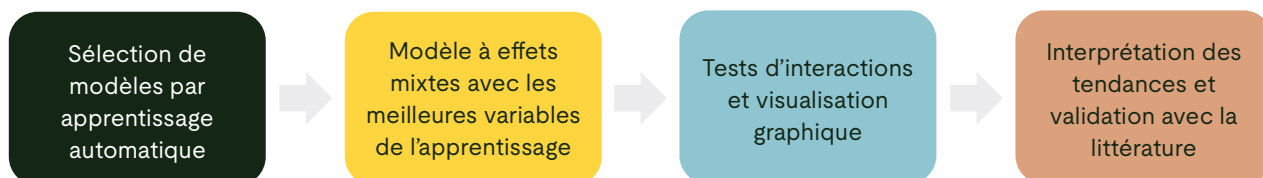
1.3. Analyse des données

Les analyses réalisées dans ce projet ont pour but d'identifier les variables explicatives qui ont le plus d'influence sur la variable réponse. La variable réponse utilisée à l'échelle du secteur d'intervention est la proportion moyenne de surface terrière résiduelle blessée, tandis qu'à l'échelle de la tige, la présence de blessures déclarées est utilisée. Il est essentiel de retenir que seules les blessures qui respectent les critères d'évaluation du MRNF disponibles à l'annexe A ont été comptabilisées dans les données reçues au cours de cette étude. Les blessures trop petites pour être déclarées n'ont donc pas été considérées dans les analyses. La figure 4 montre un exemple de blessure déclarée, qui a un impact plus grave sur la croissance et la dégradation de l'arbre.



Figure 4. Exemple d'un bouleau jaune présentant une blessure de pied et une blessure de racine qui doivent être déclarées selon les critères d'évaluation du MRNF (2024).

L'analyse de chaque base de données s'est effectuée en quatre phases distinctes. Celles-ci sont présentées ci-dessous.





1.3.1. Sélection de modèles par apprentissage automatique

La première étape des analyses visait à mettre en évidence une sélection préliminaire de variables explicatives susceptibles d'exercer un effet significatif sur les blessures aux arbres résiduels. À cette étape, les variables qui n'avaient aucun impact ou qui ajoutaient du bruit aux modèles statistiques ont été retirées pour les analyses subséquentes. Le processus d'analyse par apprentissage automatique comprend plusieurs étapes.

Les données de chaque variable ont d'abord été normalisées afin de respecter les prérequis pour entraîner des modèles à l'aide d'une technique d'apprentissage automatisé (Sullivan, 2022), aussi connue sous le nom d'« AutoML ». Un outil basé sur AutoML, développé en Python, a été utilisé pour automatiser différentes étapes du prétraitement des données, jusqu'à l'exportation d'un rapport d'analyse des données (Figure 5). Le pouvoir prédictif des variables explicatives à l'égard du pourcentage de tiges blessées a été testé à l'aide de modèles de régression optimisés par un algorithme d'optimisation de l'outil. Pour faire suite à la création d'une grande quantité de modèles combinant les variables explicatives, ceux-ci ont été discriminés en fonction de l'exactitude et de la précision des prédictions sur le pourcentage de tiges blessées (Figure 5). Les variables permettant de produire le modèle avec la meilleure prédiction ont été retenues à l'aide des valeurs de SHAP (*Shapley additive explanations*) (Lundberg et Lee, 2017). Les valeurs de SHAP ont démontré des performances très intéressantes dans l'interprétation et la sélection des meilleures variables prédictives (Marcilio et Eler, 2020). C'est à partir d'un résumé de la puissance prédictive de chaque variable et de leurs valeurs de SHAP qu'une première sélection a été réalisée pour la suite des analyses. Seules les variables qui nuisaient au modèle ou qui n'avaient aucun potentiel prédictif ont été écartées.

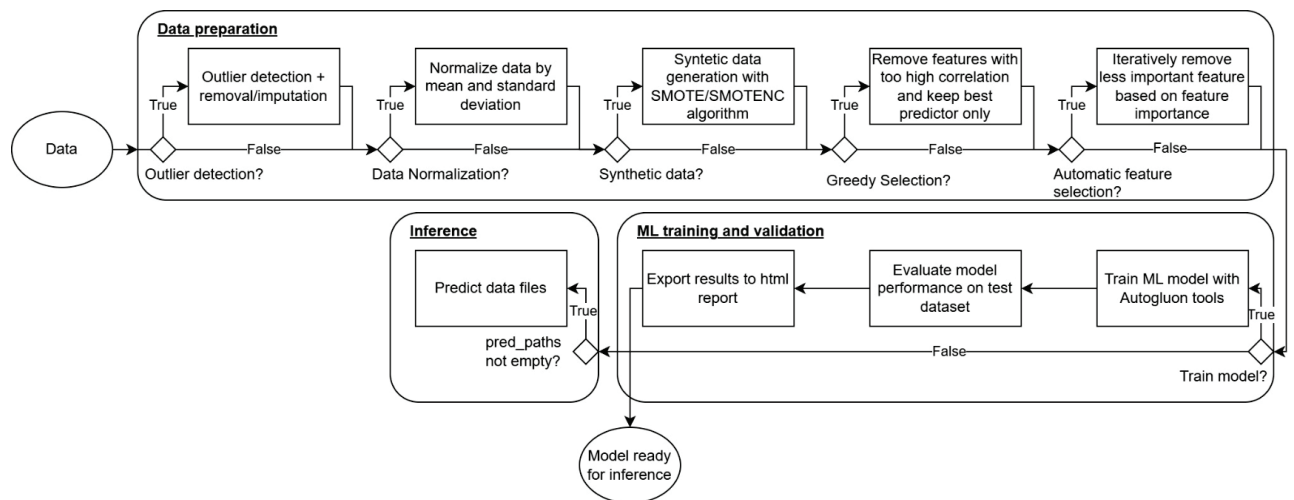


Figure 5. Processus de préparation des données et d'analyse des données par apprentissage automatisé.

1.3.2. Modèles à effets mixtes

Une fois que les meilleures variables explicatives ont été retenues par AutoML, une sélection de modèles à effets mixtes a été réalisée dans R version 4.3.1 (R Core Team, 2023). Pour s'assurer de tenir compte des différences régionales qui pourraient biaiser les résultats, l'unité d'aménagement a été utilisée comme effet aléatoire dans tous les modèles à effets mixtes. La sélection de modèle avait pour objectif de confirmer les effets observés par AutoML à l'aide de méthodes statistiques reconnues en science. Le facteur BIC (Neath et Cavanaugh, 2012), très reconnu pour son efficacité à identifier les modèles les plus parcimonieux, a été utilisé pour identifier les meilleurs modèles pour prédire les blessures aux arbres après coupe et les effets



significatifs. Les données contenaient beaucoup de valeurs égales à zéro dans toutes les bases de données, ce qui a nécessité de paramétrer les modèles avec une distribution de Tweedie ou binomiale, selon les données utilisées. Le package « glmmTMB » avec l'extension « zero-inflation » (Brooks *et al.*, 2017) a été utilisé pour l'ensemble des tests statistiques présentés dans cette étude.

1.3.3. Interactions et visualisation

Une fois les modèles sélectionnés en incluant l'unité d'aménagement comme effet aléatoire, d'autres tests statistiques ainsi que des graphiques permettant de mieux visualiser les interactions entre les variables explicatives ont été réalisés.

1.3.4. Interprétation des résultats

Bien que les statistiques démontrent des tendances, leur interprétation nécessite de consulter les experts des entreprises forestières participantes ayant pris part aux sorties sur le terrain lors de coupes partielles. Des rencontres ont été planifiées dans le cadre du projet afin de discuter des résultats statistiques et d'expliquer les tendances observées. Les observations terrain, puis les préoccupations des industriels et du MRNF ont été recueillies afin d'alimenter les hypothèses et l'interprétation des résultats sur les sources de blessures ainsi que les recommandations pour les atténuer. Le présent rapport formule donc des recommandations en se basant sur des résultats statistiques, l'interprétation d'experts industriels et les connaissances de la littérature scientifique.



2. Limites des données

2.1. Effet aléatoire

Les premières analyses statistiques ont démontré que les différences régionales étaient hautement significatives. Certaines s'expliquent probablement par les conditions de terrain, le procédé de récolte et la réglementation qui diffère selon les régions. Comme la présente étude avait pour but d'identifier les tendances pour minimiser les blessures à l'échelle provinciale, ces différences ont notamment été considérées en utilisant l'unité d'aménagement comme effet aléatoire dans les statistiques. Pour limiter la capture d'un effet régional confondant, une attention particulière a été accordée à recueillir des données (en peuplements feuillus et mixtes) réparties dans un maximum de régions différentes du Québec.

2.2. Données industrielles

Pour limiter le plus possible les biais possibles des données reçues par les industriels partenaires au projet, trois stratégies ont été employées. En premier lieu, la confidentialité des données a été garantie dès le départ pour limiter tout motif relatif à la concurrence ou à la performance d'un industriel par rapport à un autre ou par rapport au MRNF. En second lieu, un effort a été fourni afin de récolter des données d'un maximum d'industriels différents pour limiter l'effet que pourraient avoir les méthodes et l'expérience des équipes sur les conclusions des analyses. Enfin, une vérification a été effectuée sur chaque donnée reçue à l'aide des rapports d'exécution afin de retirer les données incomplètes ou aberrantes des bases de données. Les rapports d'exécution ont notamment permis de valider les taux de blessure et de récolte réels au lieu des taux de récolte prévus.

2.3. Déclaration des blessures différentes selon la région

Les blessures considérées dans cette étude sont celles qui ont été déclarées par les industriels selon les critères d'évaluation du MRNF présentés à l'annexe A. Par conséquent, les blessures qui ne répondent pas à ces critères, notamment les plus petites, n'ont pas été prises en compte dans les analyses. À cet égard, d'une région à l'autre, il semble y avoir des différences dans l'évaluation de la proportion de surface terrière blessée, principalement à cause des essences sans preneurs pour lesquelles les blessures ne sont pas toujours comptabilisées. Par exemple, les tiges blessées de pruche et de thuya, deux essences sans preneurs dans plusieurs régions du Québec, ne sont pas comptabilisées si des ententes ont été conclues avec le MRNF. Cela peut ainsi réduire le pourcentage de surface terrière résiduelle blessée dans les peuplements concernés. Un autre biais mentionné dans la section des résultats à l'échelle de la tige est la déclaration des tiges renversées. Les arbres renversés étaient considérés comme blessés dans les données de placettes-échantillons utilisées, mais les moyennes générales de surface terrière résiduelle blessée peuvent fortement changer, sachant que plus de 25 % des blessures déclarées étaient des tiges renversées. C'est pourquoi il a été décidé de présenter les résultats avec et sans tiges renversées dans la section 3.3.1 de cette étude.

2.4. Déplacement de la machinerie

Les données de suivi de la machinerie (*tracking*) ont généralement été prises par les abatteuses pour identifier les sentiers potentiels réalisés et utilisés par les débardeurs. En revanche, considérant que les abatteuses peuvent faire des sentiers dits « fantômes » qui ne sont pas utilisés par les débardeurs, une partie du bruit observé dans les analyses pourrait provenir de cette source. Cela fait en sorte qu'il est également impossible de confirmer statistiquement que les blessures ont été causées davantage par le débardeur que par l'abatteuse. La littérature scientifique a donc été utilisée pour interpréter les résultats obtenus.



3. Résultats

3.1. Effet régional

Les premières analyses ont démontré que l'un des effets les plus significatifs sur le pourcentage de tiges résiduelles blessées est l'unité d'aménagement (plusieurs UA par région administrative) dans laquelle les travaux ont été effectués. Cela confirme la présence de différences entre les régions, que ce soit par rapport aux conditions de terrain, aux modalités de récolte, aux ententes régionales ou aux équipements utilisés. L'effet régional doit être considéré pour le reste des analyses et c'est pourquoi l'effet aléatoire retenu pour l'ensemble des modèles générés dans cette étude est l'unité d'aménagement (UA). L'année a également été testée comme variable possible pour un effet aléatoire, mais celle-ci a très peu d'effet sur les blessures en comparaison avec l'UA.

Malgré des effets régionaux notables sur la proportion de tiges résiduelles blessées après coupe, des tendances provinciales ont pu être observées. Les effets régionaux génèrent cependant une forte variabilité dans les données, ce qui explique les nuages de points relativement dispersés qui sont présentés dans cette section. Les résultats sont présentés en quatre sections selon la base de données utilisée.

3.2. Résultats à l'échelle des secteurs d'intervention provinciaux

Des analyses ont été effectuées dans 566 secteurs d'intervention pour lesquels la surface terrière de tiges résiduelles blessées avait été compilée par des suivis après coupe. Les différents traitements et procédés de récolte étudiés sont détaillés à l'annexe D.

3.2.1. Traitement

Comme illustré sur la figure 6, la CPI_RL (groupe A) semble significativement augmenter la surface terrière résiduelle blessée par rapport à la CPI_CP (groupe B). La proportion moyenne de tiges blessées se situe autour de 7,9 % pour la CPI_RL, contre 5,4 % et 4,7 % pour la CPI_CP et la CJ. Aucune différence significative n'a été observée entre la CJ (groupe A et B) et les deux autres traitements. Cela s'explique probablement par le faible nombre de secteurs d'intervention traités en CJ (62) par rapport aux deux autres traitements. En décortiquant les données de surface terrière prélevée, la composante feuillue semble avoir un impact plus grand sur les blessures déclarées que la composante résineuse.

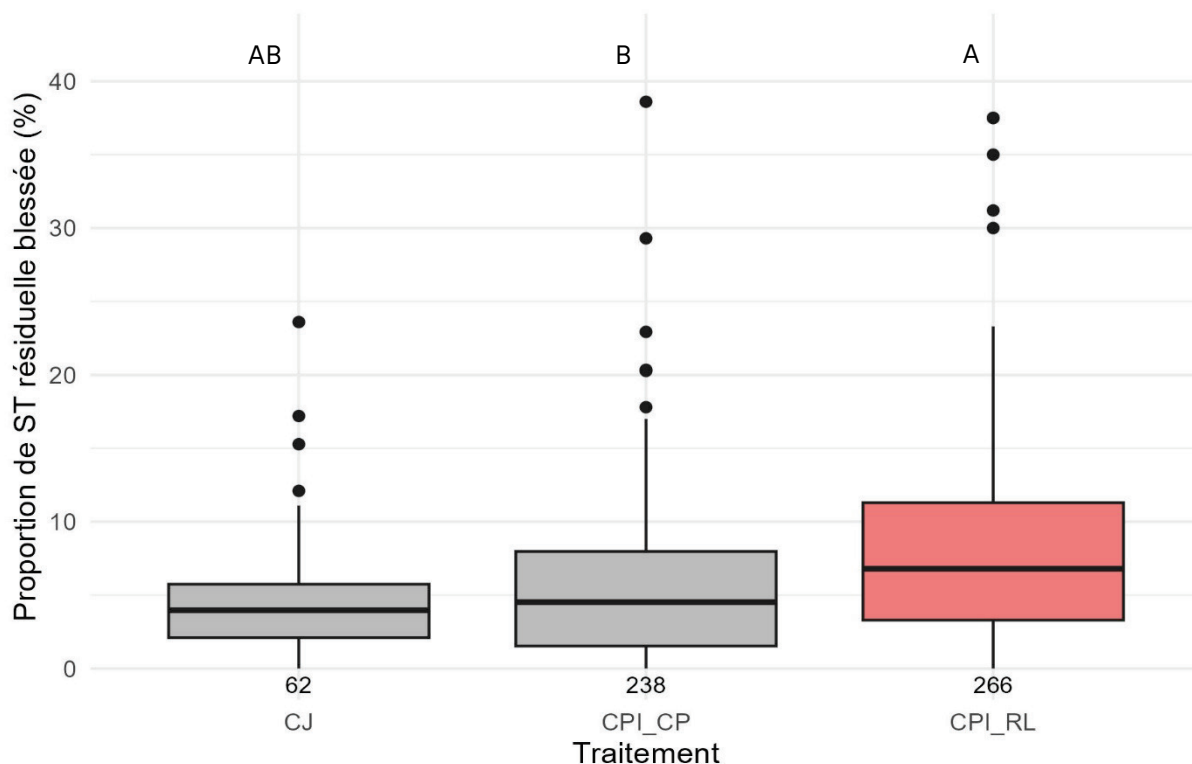


Figure 6. Diagramme sous forme de boîte à moustaches représentant la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée selon le traitement appliqué. Les traitements ont été positionnés par ordre croissant de prélèvement en surface terrière avec le nombre de secteurs d'intervention analysés sous chaque boîte. L'intérieur des boîtes représente une plage de valeurs qui contient 50 % des données de chaque traitement, tandis que la barre centrale représente la médiane.

Afin de confirmer le lien entre la CPI_RL, qui présentait le taux de prélèvement le plus fort (40 % de la surface terrière initiale), et la proportion plus élevée de blessures, des tests sur la base de données des SI industriels ont été réalisés. Les sections 3.2.2 à 3.2.5 résulte de l'analyse des données à l'échelle du secteur d'intervention fournies par les industriels.

3.2.2. Surface terrière récoltée

Un premier effet observé à partir de la base de données des secteurs d'intervention fournie par les industriels est l'augmentation importante ($p < 0,01$) de la proportion de la surface terrière résiduelle blessée à mesure que la proportion de surface terrière récoltée augmente (Figure 7). L'interaction entre la proportion de surface terrière récoltée et le traitement de CPI_RL est également significative, avec une valeur de p de 0,04.

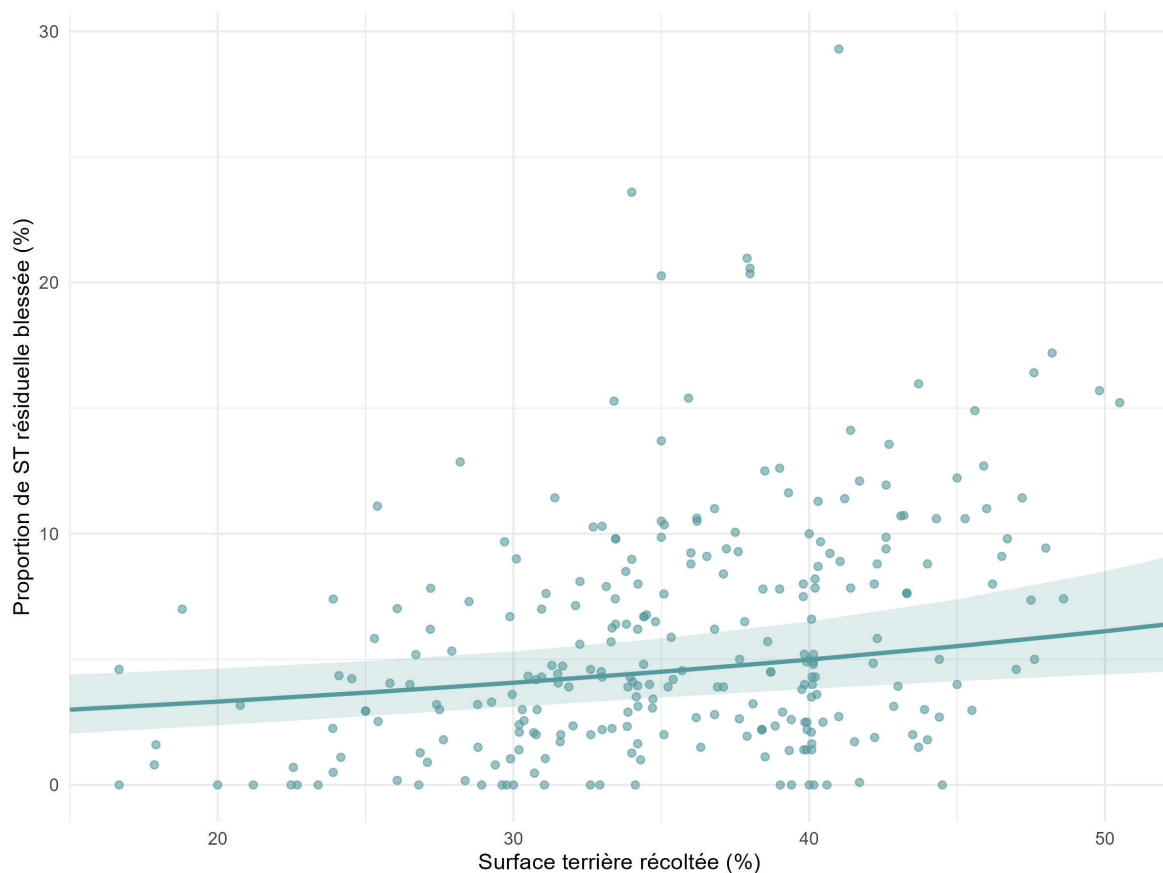


Figure 7. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) prélevée et la proportion de surface terrière résiduelle blessée. La zone bleue correspond à l'intervalle de confiance du modèle. Ce résultat s'applique seulement aux coupes partielles dont le prélèvement minimal était de 13 % et le prélèvement maximal était de 52 %.

Afin de décortiquer ce résultat, des analyses supplémentaires sur les SI industriels ont démontré que la composante feuillue de la surface terrière récoltée en m²/ha semble augmenter significativement le pourcentage de tiges blessées après coupe ($p < 0,01$). La figure 8 indique une augmentation générale de la proportion de tiges blessées à mesure que la surface terrière feuillue récoltée augmente.

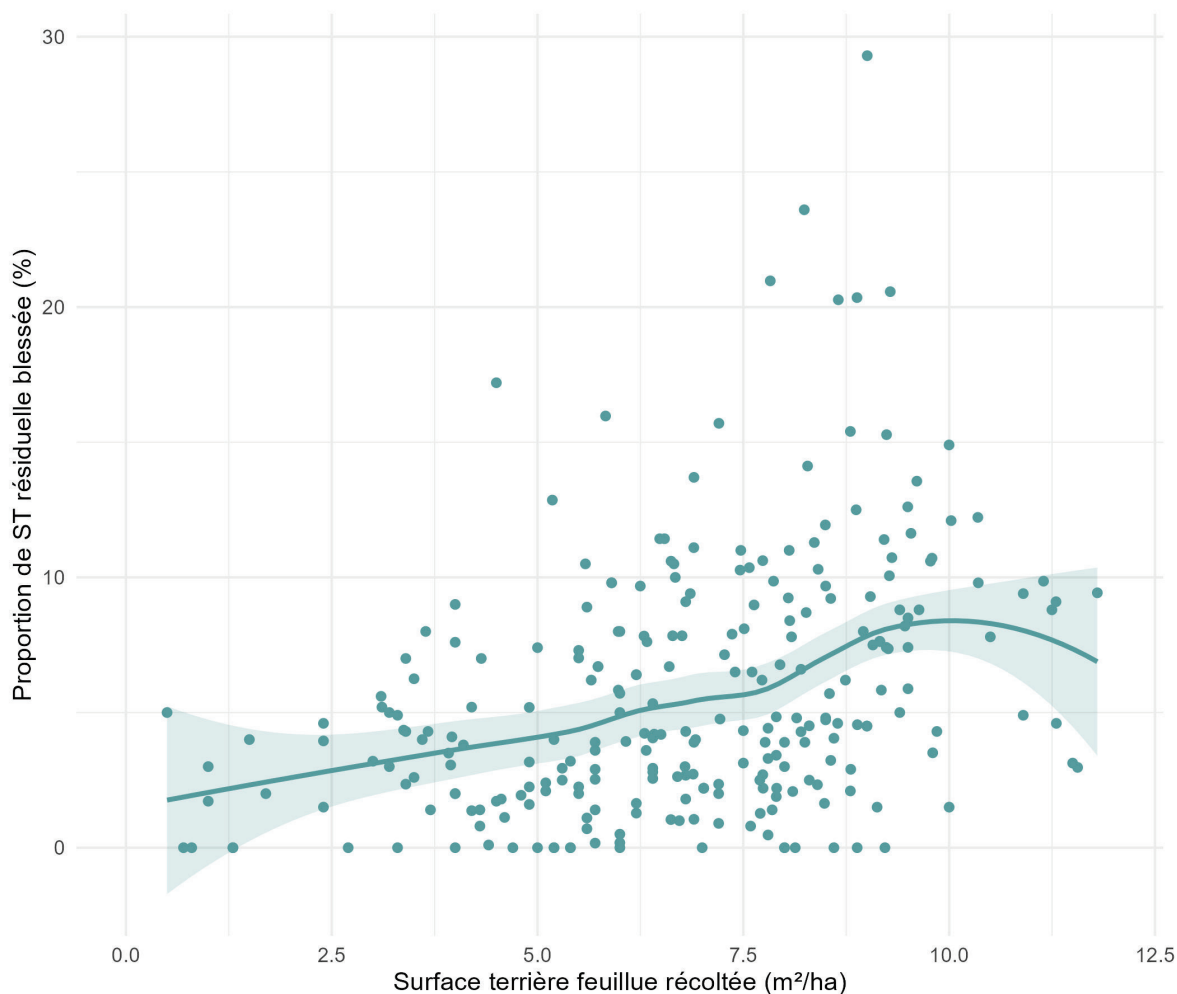


Figure 8. Relation entre la surface terrière (ST) feuillue prélevée et la proportion de surface terrière blessée, représentée par une courbe de LOESS. La zone bleue correspond à l'intervalle de confiance du modèle.

Il semble y avoir une faible diminution de la surface terrière blessée à partir de 10 m²/ha. Cependant, le faible nombre de points et l'augmentation de l'incertitude liée à l'intervalle de confiance du modèle ne permettent pas d'en tirer de conclusions. Aucune autre variable liée à la surface terrière récoltée ou résiduelle n'a mené à des résultats significatifs.

3.2.3. Procédés de récolte

Le procédé de récolte n'a pas eu d'impact significatif sur la proportion de surface terrière blessée à la suite des opérations de récolte. Toutefois, la valeur moyenne du procédé en bois long apparaît plus haute que celle du procédé en bois court (Figure 9). Il est également possible de constater que le nombre de SI en procédé de bois long analysés est supérieur à celui des deux autres procédés, en plus de présenter une grande variabilité à l'échelle de la province.

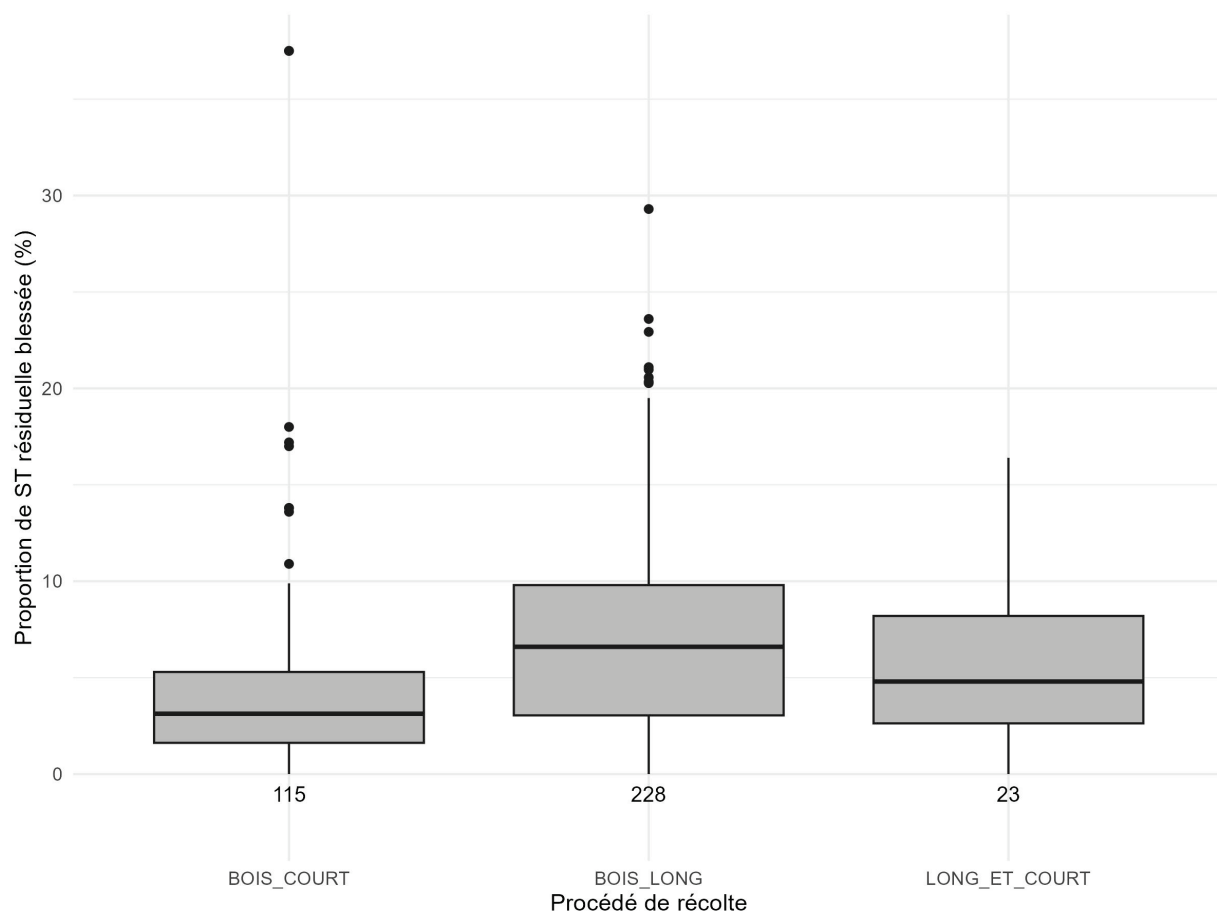


Figure 9. Diagramme sous forme de boîte à moustaches représentant la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée, en fonction du procédé de récolte. Le nombre de secteurs d'intervention analysés est présenté sous chaque boîte. L'intérieur des boîtes représente une plage de valeurs qui contient 50 % des données de chaque traitement, tandis que la barre centrale représente la médiane.



3.2.4. Saison de récolte

En étudiant les interactions entre le procédé et la saison de récolte, l'écart le plus marqué a été observé entre le procédé de bois court en hiver et le procédé de bois long en été (Figure 10). Le nombre de SI étudiés n'a cependant pas permis de confirmer un effet statistique significatif ($p = 0,051$).

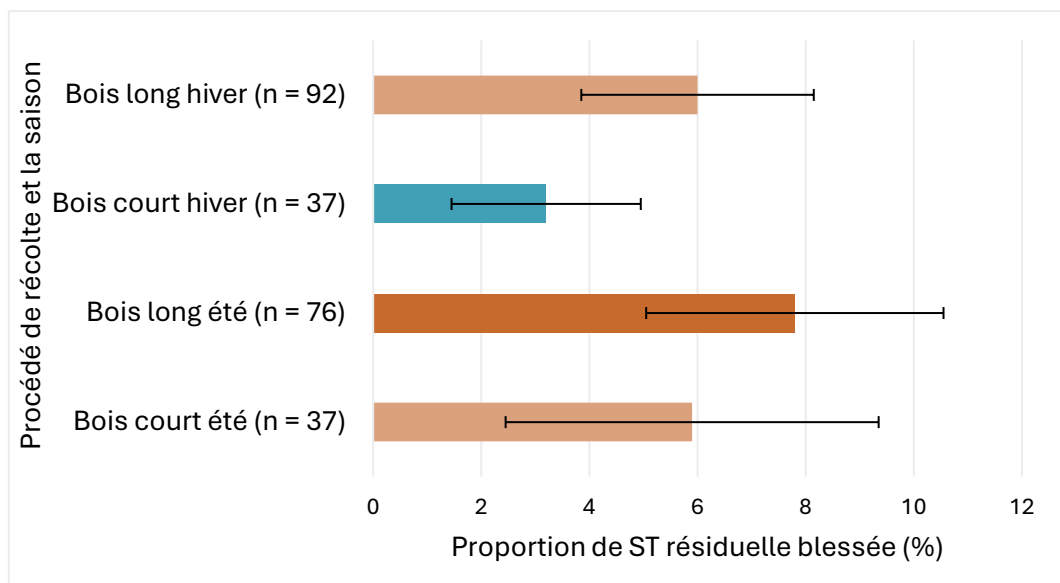


Figure 10. Surface terrière des tiges résiduelles blessées selon 4 combinaisons de procédés de récolte et de saison de début des opérations de récolte de bois.

La saison de début de récolte a un effet significatif sur le taux de blessures aux arbres résiduels à l'échelle provinciale (Figure 11). D'après les résultats statistiques, la coupe d'hiver (groupe B) cause significativement moins de blessures que la coupe d'été et d'automne (groupe A).

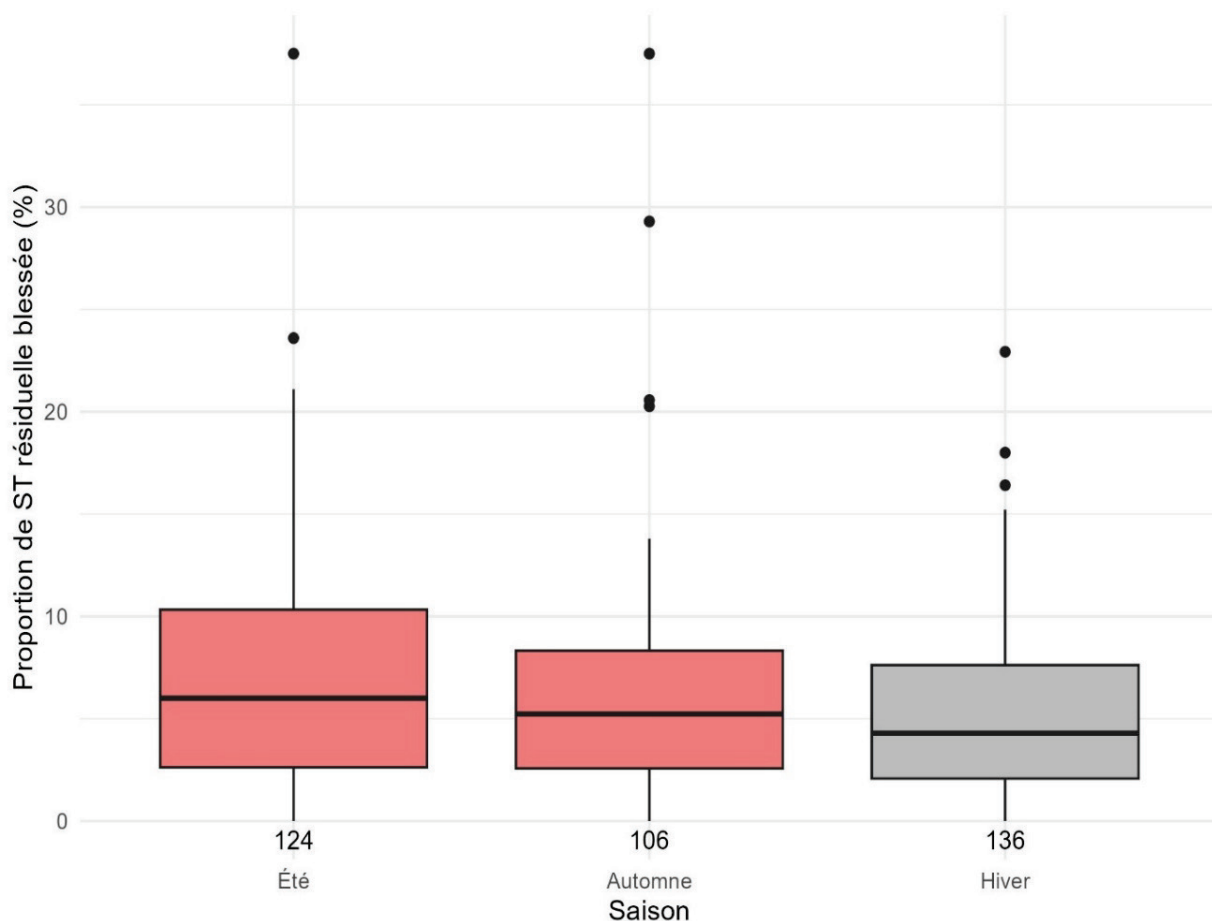


Figure 11. Diagramme sous forme de boîte à moustaches représentant la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée selon la saison de début des travaux de récolte. Le nombre de secteurs d'intervention est présenté sous chaque boîte. L'intérieur des boîtes représente une plage de valeurs qui contient 50 % des données de chaque traitement, tandis que la barre centrale représente la médiane. Les couleurs rouge et grise représentent les groupes qui diffèrent statistiquement.

Aucune différence significative n'a été observée entre les opérations réalisées en été et en automne. Cependant, les opérations d'été semblent avoir la moyenne de ST résiduelle blessée la plus élevée. Les moyennes de ST résiduelle ainsi que l'écart-type pour chaque saison sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Proportion moyenne de la surface terrière (ST) résiduelle blessée et écart-type en fonction de la saison de début des travaux de récolte forestière.

Saison de début des travaux	Proportion de ST résiduelle blessée (%)	Écart-type (%)
Été	7,2	6,0
Automne	6,3	5,5
Hiver	5,1	4,2



Ces résultats semblent corroborer les observations de Grzywiński *et al.* (2019), Hwang *et al.* (2018) et Sirén (2001) concernant l'augmentation des blessures durant les saisons plus chaudes, lorsque la sève circule davantage sous l'écorce des arbres.

3.2.5. Secteurs qui dépassent le seuil de 10 % de surface terrière blessée

Au Québec, le seuil jugé acceptable de dommages aux tiges résiduelles a été fixé à 10 % par le MRNF. Des pénalités sont imposées aux industriels qui le dépassent à la suite de coupes partielles. En ce sens, des portraits des secteurs d'intervention respectant le seuil et de ceux le dépassant ont été réalisés. D'après les données fournies par les industriels et les données cartographiques du Rapport d'activité technique et financier (RATF) du MRNF, environ 85 % des secteurs d'intervention ont respecté le seuil de 10 % parmi les 566 étudiés. L'analyse des portraits des secteurs d'intervention ayant dépassé le seuil du MRNF permettent de mieux anticiper ceux qui sont les plus à risque de présenter des blessures. Plusieurs variables qui ne se sont pas révélées statistiquement significatives semblent néanmoins exercer une certaine influence sur les blessures observées.

3.2.5.1. Traitement

En réalisant un portrait de la proportion de chaque traitement dans les secteurs qui respectent ou non le seuil de blessure de 10 % (Tableau 2), il semble également y avoir une proportion plus élevée de SI traités en CPI_RL lorsque le seuil de 10 % a été dépassé. À l'inverse, les secteurs qui respectaient le seuil présentaient une proportion plus élevée de CJ et de CPI_CP. Ce portrait est cohérent avec la comparaison statistique de la section 3.2.1 de cette étude dans laquelle la CPI_RL présentait une proportion plus élevée de blessures.

Tableau 2. Comparaison de la répartition des traitements utilisés dans les secteurs d'intervention respectant ou dépassant le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée du MRNF.

Intensité de blessure	Traitement	Proportion des SI (%)
≥ 10 % de la ST résiduelle blessée	CJ	5
	CPI_CP	30
	CPI_RL	65
< 10 % de la ST résiduelle blessée	CJ	13
	CPI_CP	45
	CPI_RL	42

3.2.5.2. Procédés de récolte

Bien que les analyses statistiques n'aient pas permis de démontrer un effet significatif du procédé de récolte, le portrait des secteurs ayant dépassé le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée laisse entrevoir certaines tendances. Les données du tableau 3 montrent que plus de 80 % de ces secteurs ont été récoltés par procédés en bois long. À l'inverse, la proportion de ces secteurs traités en bois court est environ deux fois plus élevée parmi les secteurs ayant respecté le seuil de 10 %. Ces observations suggèrent une influence possible du procédé de récolte, sans toutefois permettre de la confirmer statistiquement.



Tableau 3. Comparaison de la répartition des procédés de récolte utilisés dans les secteurs d'intervention respectant ou dépassant le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée du MRNF.

Intensité de blessure	Procédé de récolte	Proportion des SI (%)
≥ 10 % de la ST résiduelle blessée	Bois court	14
	Bois long	82
	Bois long et court	5
< 10 % de la ST résiduelle blessée	Bois court	34
	Bois long	59
	Bois long et court	6

3.2.5.3. Saison de début des opérations

Le tableau 4 semble confirmer l'effet bénéfique des opérations hivernales par rapport aux opérations estivales. Une proportion plus forte de SI réalisés en hiver est observée parmi les secteurs ayant respecté le seuil de blessures. À l'inverse, la proportion de SI dont les chantiers ont débuté en été apparaît plus élevée parmi les secteurs ayant dépassé le seuil de 10 %.

Tableau 4. Comparaison de la répartition des saisons de début des opérations dans les secteurs d'intervention qui respectent ou non le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée du MRNF.

Intensité de blessure	Saison	Proportion des SI (%)
≥ 10 % de la ST résiduelle blessée	Hiver	27
	Été	50
	Automne	23
< 10 % de la ST résiduelle blessée	Hiver	40
	Été	30
	Automne	30

3.2.5.4. Contraintes et densité

Au Québec, les données des RATF mises à disposition par le MRNF contiennent des cartes d'intensité de contraintes. Des différences peuvent être observées en comparant la présence de contraintes élevées entre les secteurs respectant le seuil de 10 % de ST résiduelle blessée du MRNF et ceux le dépassant.

Un premier constat est que les contraintes élevées de pente, d'érosion et de sensibilité sont de 5 % à 10 % plus présentes dans les secteurs ≥ 10 % de ST blessée (Figure 12). Un second constat, plutôt surprenant, est que les peuplements moins denses (25 % à 60 % de couverture de canopée) ont une proportion de superficies près de quatre fois plus élevée dans les secteurs ≥ 10 % de ST blessée (Figure 12). Cela signifie que même si les couverts plus denses ont généralement plus d'arbres susceptibles d'être blessés, d'autres facteurs, tels que la structure ou le milieu physique, rendent les peuplements denses moins susceptibles de subir des blessures. L'interprétation de cette observation est discutée plus en détail à la section 4.2.2.

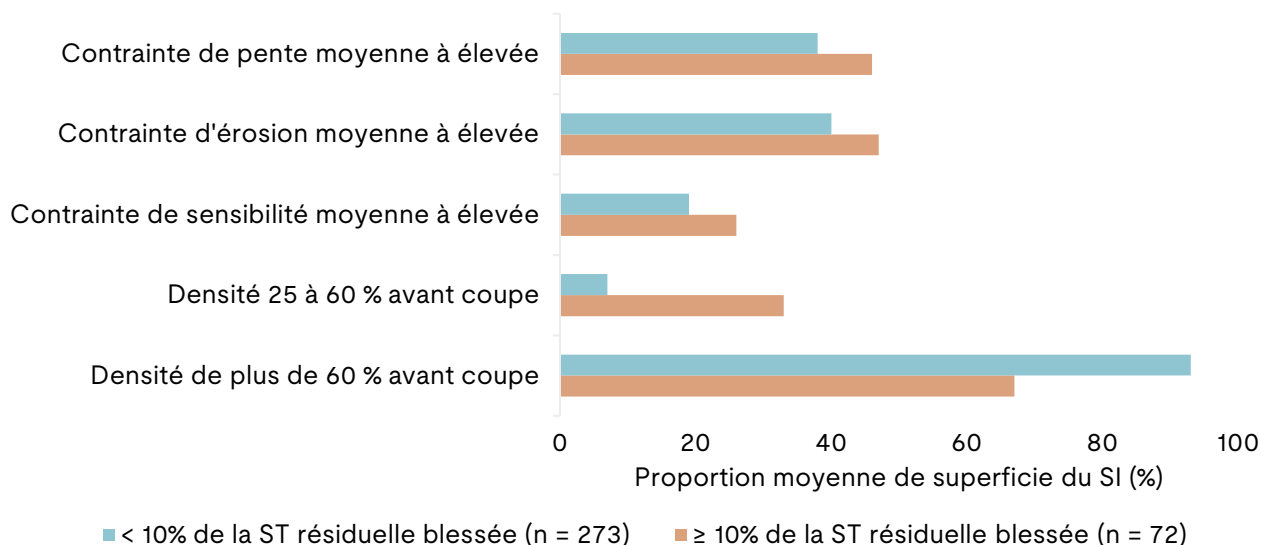


Figure 12. Comparaison de la densité et des contraintes de pente, d'érosion et de sensibilité dans des secteurs d'intervention respectant ou dépassant le seuil de 10 % de surface terrière résiduelle blessée imposé par le MRNF.

Note : Les contraintes présentées dans la figure ci-dessus sont définies ainsi :

- **Contrainte de sensibilité :** indice de sensibilité du milieu aux perturbations associées à la circulation de la machinerie forestière, notamment l'orniérage et la compaction des sols.
- **Contrainte d'érosion :** indication du potentiel d'érosion hydrique associé aux conditions de sol et de pente du site.
- **Contrainte de pente :** pourcentage d'inclinaison du terrain calculé à partir d'un modèle numérique de terrain.

3.3. Résultats à l'échelle de la tige

Des analyses ont été effectuées à l'échelle de la tige dans 1846 placettes après coupe à rayon variable (prisme de facteur 2) dans le but d'identifier les tiges les plus susceptibles d'être blessées à la suite d'une coupe partielle.

3.3.1. Diamètre des tiges blessées

Les analyses effectuées dans les compilations mesurées à l'échelle de la tige dans des placettes-échantillons après coupe dans la province ont révélé que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres résiduels était l'élément le plus important pour prédire la proportion de ST blessée. Une tendance significative ($p < 0,01$) de type puissance semble indiquer que les arbres résiduels de faible diamètre sont nettement plus à risque d'être blessés lors des opérations. La figure 13 présente la tendance observée en incluant tous les types de blessures assujetties aux critères d'évaluation du MRNF (Annexe A).

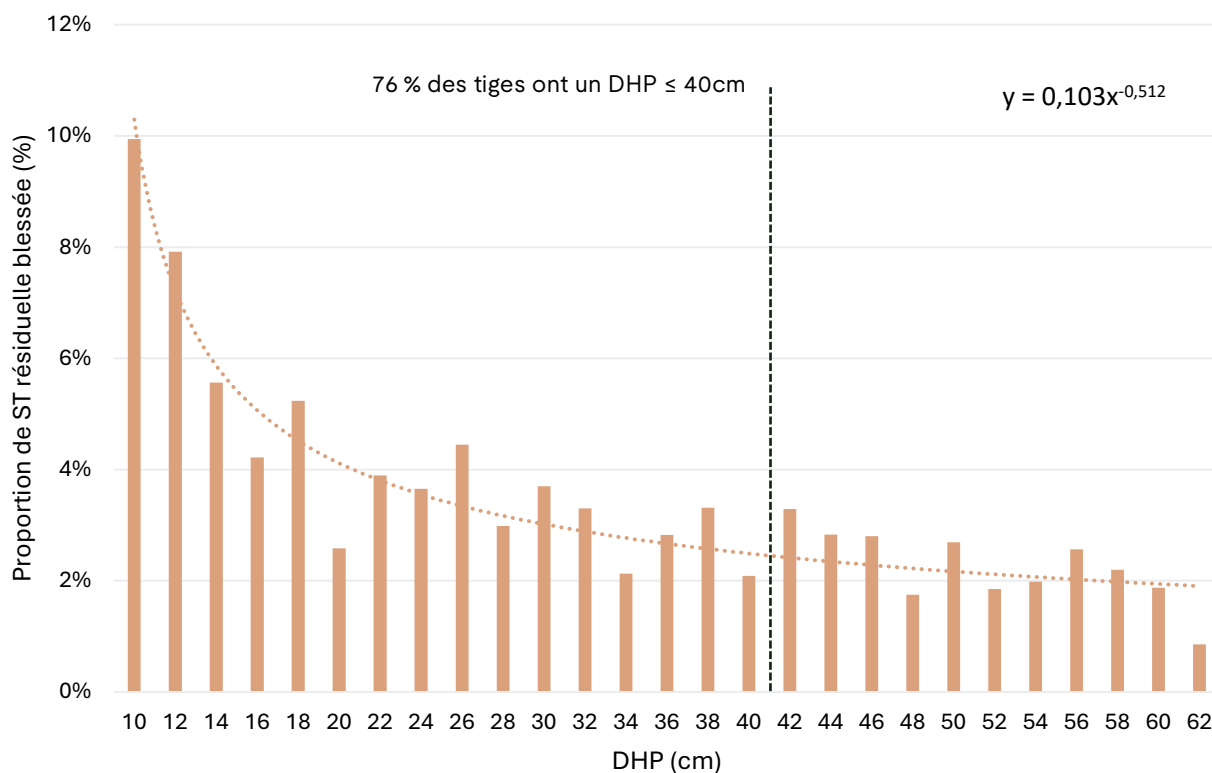


Figure 13. Proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des tiges résiduelles. Les classes de 2 cm de DHP affichées sont toutes représentées par au moins 100 tiges. Les tiges de 63 cm de diamètre et plus ont été retirées du graphique par manque de données pour établir une relation fiable de proportion de ST résiduelle blessée.

Des discussions avec les partenaires industriels du projet ont mis en évidence des différences régionales dans la déclaration des arbres renversés. Dans certaines régions, ceux-ci sont considérés comme des arbres coupés et ne sont donc pas comptabilisés dans l'évaluation du pourcentage de blessures. Afin d'évaluer l'influence de cette pratique, un test a été effectué en retirant des analyses tous les arbres renversés considérés comme coupés. Une tendance statistiquement significative de diminution de la proportion de tiges blessées à mesure que le DHP augmente demeure observable (Figure 14). Cependant, la courbe de tendance est moins prononcée et s'apparente davantage à une tendance de type linéaire.

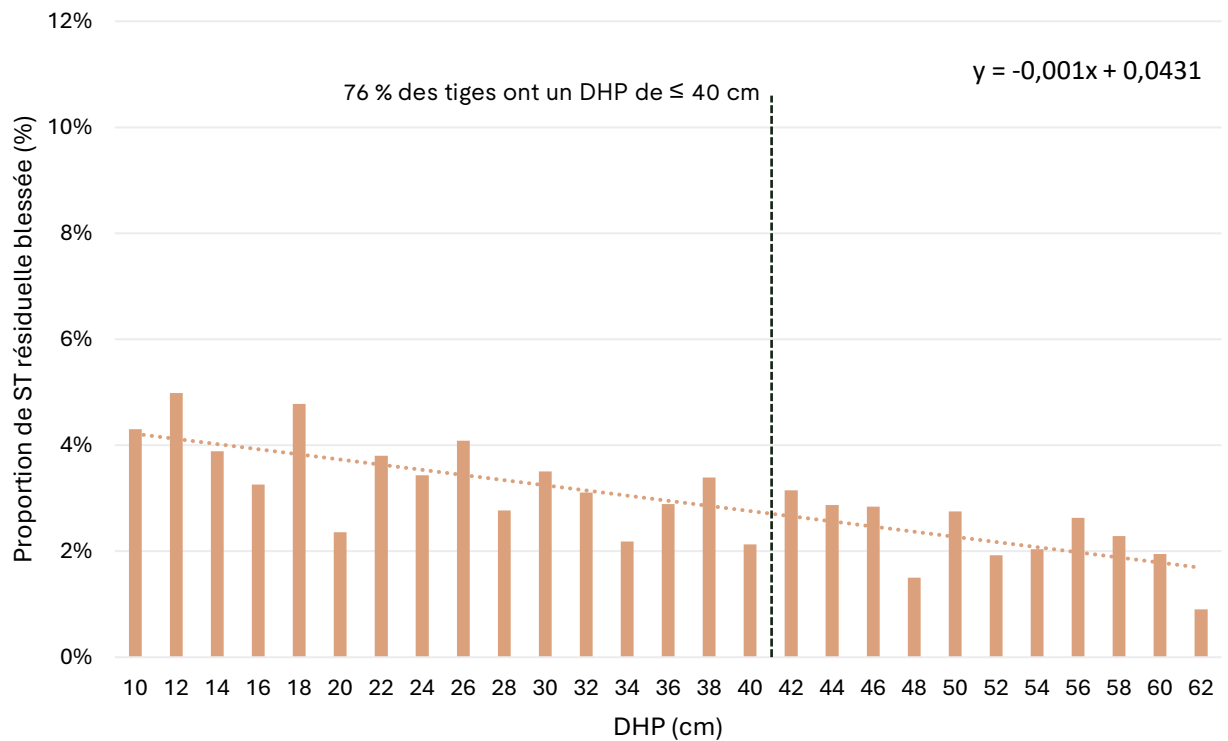


Figure 14. Proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des tiges résiduelles en ne considérant pas les tiges renversées comme blessées. Les classes de 2 cm de DHP affichées sont toutes représentées par au moins 100 tiges.

3.3.2. Caractéristiques des tiges résiduelles blessées

3.3.2.1. Essences

Il n'y a pas de différences significatives entre la proportion de ST résiduelle feuillue et résineuse blessée, avec une moyenne de 4,4 % pour les feuillus et de 4 % pour les résineux. En analysant le portrait des blessures par essence (Tableau 5), il est possible de constater un pourcentage de ST résiduelle blessée plus élevé pour le hêtre à grandes feuilles. Cela pourrait s'expliquer par l'utilisation, par plusieurs industriels de cette essence comme arbre protecteur en bordure de sentiers d'abattage et de débardage.



Tableau 5. Proportion de surface terrière blessée pour les essences les plus présentes dans les placettes-échantillons de l'étude.

Essence	Surface terrière blessée (%)
Bouleau jaune (BOJ)	4,7 %
Bouleau à papier (POP)	2,9 %
Chêne rouge (CHR)	4,4 %
Épinette blanche (EPB)	4,4 %
Épinette noire (EPN)	3,5 %
Érable rouge (ERR)	4,7 %
Érable à sucre (ERS)	4,7 %
Frêne noir (FRN)	3,9 %
Hêtre à grandes feuilles (HEG)	8,7 %
Peuplier faux-tremble (PET)	0 %
Pin blanc (PIB)	3,0 %
Pruche d'Amérique (PRU)	0,5 %
Sapin baumier (SAB)	3,8 %
Thuya occidental (THO)	4,2 %

Note : les essences présentées avaient au minimum 100 tiges parmi l'ensemble des placettes analysées dans cette étude.

3.3.2.2. Types de blessures

D'après le portrait des blessures observées sur les tiges résiduelles, les plus fréquentes sont les blessures de pied, autant pour les résineux que pour les feuillus (Tableau 6). Les arbres renversés sont la deuxième source de blessures la plus fréquente. Les résineux semblent davantage touchés par le renversement, alors que les blessures de houppier touchent davantage les feuillus.

Tableau 6. Proportion des types de blessures observés sur les feuillus et les résineux dans les placettes analysées.

Résineux		Feuillus	
Types de blessures	Importance parmi les tiges blessées	Types de blessures	Importance parmi les tiges blessées
Blessure de pied	37,8 %	Blessure de pied	41,9 %
Arbre renversé	39,3 %	Arbre renversé	25,2 %
Blessure de houppier	1,0 %	Blessure de houppier	8,3 %
Blessure de racine	0,6 %	Blessure de racine	0,8 %
Non spécifié	21,3 %	Non spécifié	23,8 %



3.4. Résultats de l'analyse des déplacements de la machinerie

Des analyses ont été effectuées sur les données de suivi de la machinerie (*tracking*) fournies par les industriels. Un total de 307 secteurs d'intervention, dont 31 disposaient également de données de placettes d'inventaire après coupe, ont servi aux analyses. Les secteurs disponibles ont tous été traités en coupe partielle par procédé de bois long (Annexe D.).

3.4.1. Distance d'un sentier d'abatage

En analysant la distance calculée entre le centre des placettes après coupe et les sentiers d'abatage les plus proches, la proportion de ST résiduelle blessée semble augmenter significativement ($p < 0,05$) à mesure que l'on se rapproche des sentiers d'abatage. Cela confirme que l'abatteuse groupeuse et la débusqueuse causent des blessures sur leur passage. La courbe de LOESS de la figure 15 semble indiquer une valeur maximale de blessures à une distance de 7 m et moins d'un sentier, puis une diminution rapide au-delà de 7 m. Cette observation peut s'expliquer par des accrochages lors du déplacement de la machinerie et par le déplacement des tiges coupées vers le sentier de débardage.

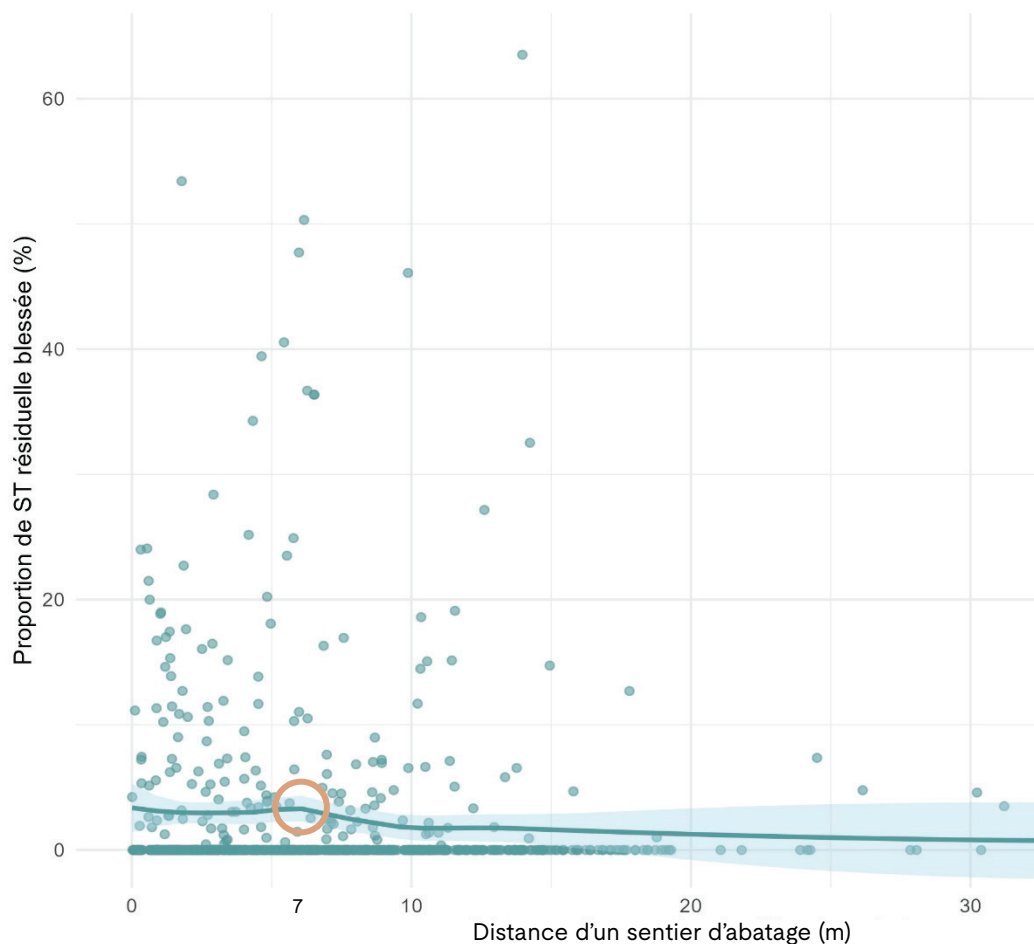


Figure 15. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée et la distance entre le centre d'une placette de suivi des opérations après coupe et le sentier d'abatage le plus proche. Chaque point représente l'une des 698 placettes étudiées dans 31 secteurs d'intervention. La zone bleue correspond à l'intervalle de confiance du modèle.



3.4.2. Superficie des sentiers

D'après les analyses effectuées sur les données de déplacement à l'échelle du SI, la ST résiduelle blessée augmente significativement ($p < 0,05$) lorsque la proportion de la superficie occupée par des sentiers augmente. Il est possible de constater sur la figure 16 qu'un SI dont 20 % ou plus de la superficie est occupée par des sentiers a très peu de chances de ne présenter aucune blessure et beaucoup plus de chances d'atteindre le seuil de 10 % de blessures établi par le MRNF.

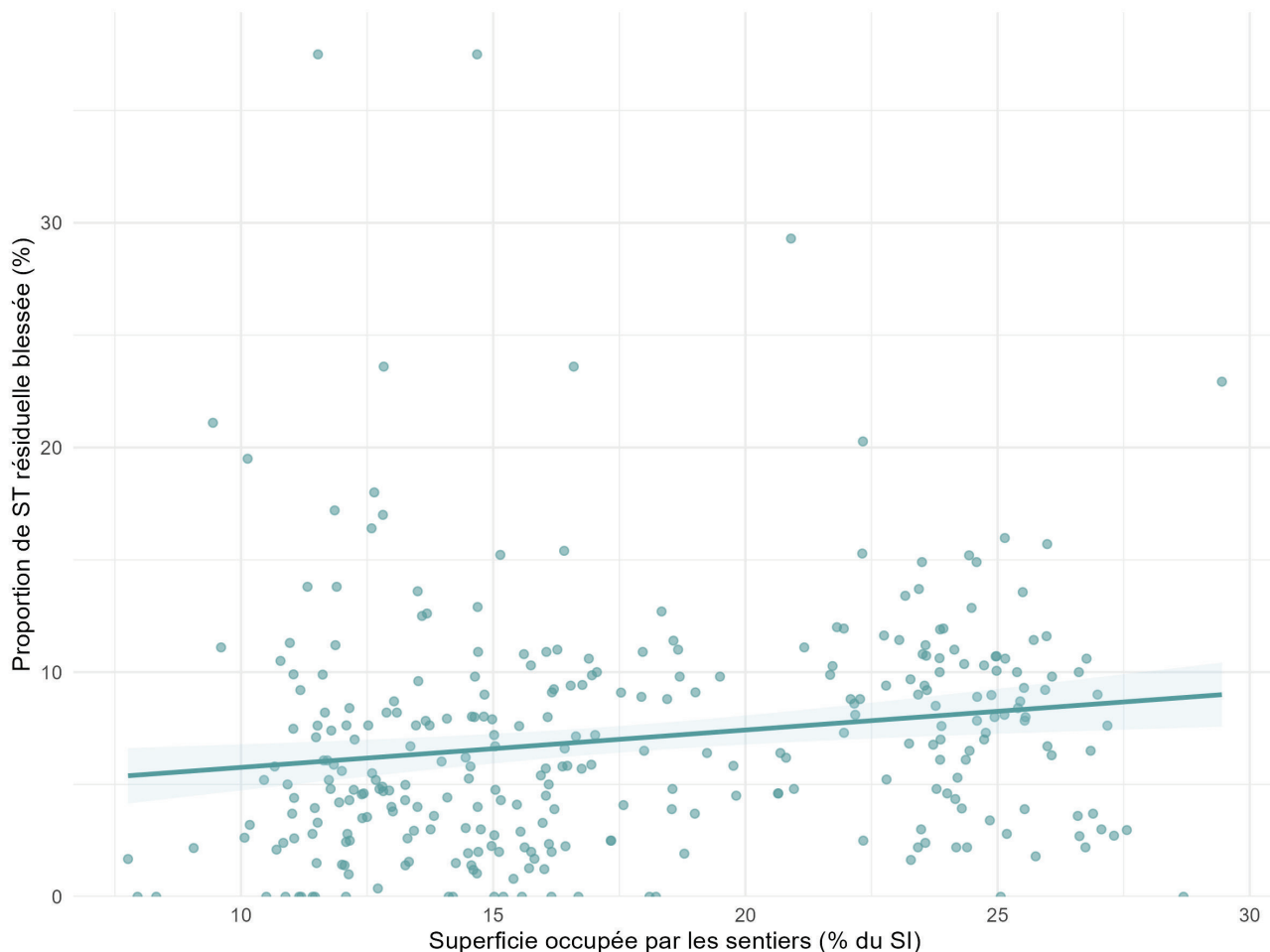


Figure 16. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée et la proportion de superficie occupée par les sentiers d'abattage dans chaque secteur d'intervention (SI). Chaque point représente l'un des 307 secteurs d'intervention étudiés. La zone bleue correspond à l'intervalle de confiance du modèle linéaire.



3.4.3. Courbure des sentiers

Des analyses ont été effectuées sur la sinuosité des sentiers d'abattage afin d'évaluer si le niveau de courbure (sinuosité) des sentiers exerce une influence sur les blessures aux tiges résiduelles. À la suite de la modélisation, aucun effet significatif n'a été identifié en raison de la variabilité des données. Cependant, une tendance à l'augmentation des blessures semble se dessiner lorsque la courbure des sentiers est élevée (Figure 17).



Figure 17. Relation entre la proportion de surface terrière (ST) résiduelle blessée et la sinuosité moyenne des sentiers d'abattage dans chaque secteur d'intervention (SI). Chaque point représente l'un des 307 secteurs d'intervention étudiés. La zone bleue correspond à l'intervalle de confiance du modèle linéaire.



4. Discussion sur les conditions de risque de blessures

Cette discussion vise à identifier les conditions qui augmentent le risque de blessures aux tiges résiduelles. Plusieurs des conditions mentionnées n'ont pas pu être confirmées par la présente étude, faute de données suffisantes. Cependant, ces conditions ont été observées dans d'autres études scientifiques pertinentes dans le contexte québécois ou rapportées par plusieurs experts forestiers du milieu industriel.

4.1. Conditions temporelles

4.1.1. Saison de récolte

Les résultats statistiques de cette étude démontrent que les coupes ayant commencé en hiver semblent diminuer significativement le pourcentage de ST blessée après coupe. Selon une étude réalisée en Finlande, les dommages causés aux tiges sont près de 1,5 fois plus fréquents en été qu'en hiver (Sirén, 2001). Plusieurs explications documentées dans la littérature scientifique ont été soulevées lors des discussions avec les industriels.

En premier lieu, les tissus de l'arbre ont une solidité supérieure en hiver lorsque la présence d'eau dans la partie inférieure de l'arbre et la fragilité du cambium diminuent (Grzywiński *et al.*, 2019; Hwang *et al.*, 2018). De plus, d'autres études montrent que les agents de détérioration comme les insectes et les agents pathogènes sont plus actifs et abondants durant l'été, ce qui peut augmenter la gravité des blessures infligées (Bloin *et al.*, 2022).

En second lieu, la neige offre une protection mécanique pour les racines et le pied des arbres résiduels (Nash *et al.*, 2020). La coupe d'hiver permet d'éviter plusieurs types de dommages au sol, notamment la compaction, l'orniérage, l'érosion et la perte de perméabilité, qui peuvent entraîner une baisse de fertilité (Picchio *et al.*, 2020). Le sol prend parfois plus de dix ans pour retrouver ses propriétés physiques, chimiques et biologiques (Picchio *et al.*, 2020).

Enfin, le feuillage estivale a un effet direct sur la visibilité de l'opérateur (White *et al.*, 2015). L'obstruction visuelle est d'ailleurs supérieure en été, ce qui peut augmenter les risques de blessures accidentelles lors de l'abattage et du débardage.

4.1.2. Période de la journée

Bien que les données de la présente étude n'aient pas permis d'évaluer l'impact de la période de la journée sur les blessures aux tiges résiduelles, des différences ont été observées dans la littérature scientifique. D'après l'étude de Bembenek *et al.* (2020), davantage de dommages aux arbres étaient observés lorsque les conditions de luminosité naturelle étaient moins favorables ou lorsque l'éclairage artificiel était utilisé. Le moment de la journée associé au plus grand nombre de blessures aux arbres résiduels serait lors du coucher du soleil (Bembenek *et al.*, 2020). La visibilité réduite, combinée aux zones d'ombre et d'éblouissement, diminue la précision des machines.

4.1.3. Délai entre la première et la seconde coupe

Un délai prolongé (20 à 40 ans) entre la première coupe d'ensemencement et la seconde intervention dans un scénario de coupe progressive entraîne généralement le développement d'une régénération dense et haute, ce qui complexifie fortement les opérations forestières (Lee *et al.*, 2024). Cette régénération au stade de gaulis réduit la visibilité des opérateurs, entrave la circulation de la machinerie et peut augmenter les



contacts mécaniques avec les tiges résiduelles commerciales, notamment par frottement, flexion ou déviation des équipements. Plusieurs travaux réalisés dans des secteurs de coupe progressive montrent que la structure du sous-étage (densité et hauteur de la régénération) est un facteur déterminant du risque de blessures aux arbres résiduels, en particulier dans les systèmes mécanisés où la précision des déplacements est essentielle (Kizha *et al.*, 2021; Lessard *et al.*, 2021). Cette notion n'a cependant pas été abordée dans la présente étude, les données disponibles ne permettant pas de caractériser adéquatement la végétation sous couvert.

4.2. Caractéristiques du peuplement forestier

4.2.1. Obstruction visuelle

Les peuplements mixtes avec une régénération dense créent une obstruction visuelle notable qui peut augmenter les risques de frottement lors de l'abattage. D'après les discussions menées avec des experts industriels, la régénération dense de sapin et d'érable rouge dans des peuplements sans martelage est un exemple de cas où les blessures sont fréquentes. Le feuillage du sapin sous couvert est particulièrement dense, ce qui obstrue fortement la visibilité des opérateurs d'abatteuse.

4.2.2. Peuplements de faible densité

Dans la littérature scientifique, on constate que l'effet de la densité est souvent insuffisant pour prédire la quantité de blessures (Kizha *et al.*, 2021). Plusieurs études ont même démontré, à l'inverse, une proportion de tiges blessées plus élevée dans les peuplements initialement plus denses (Neath et Cavanaugh, 2012). Cependant, ces études ont généralement été réalisées dans des plantations résineuses de structure régulière, ce qui est peu représentatif des peuplements analysés dans la présente étude, qui sont en grande majorité feuillus et naturels.

Au terme des discussions avec les industriels, l'interprétation de ce résultat est que les peuplements moins denses sont souvent plus abondamment régénérés en gaules, ce qui peut grandement augmenter l'obstruction visuelle des opérateurs. D'après les portraits effectués sur les peuplements dont la ST blessée était supérieure ou égale au seuil de 10 % du MRNF, les peuplements de faible densité (25 % à 60 % de couverture de canopée) étaient davantage blessés. Cette observation est cohérente avec l'interprétation des experts industriels concernant l'obstruction visuelle élevée de la végétation sous couvert dans les peuplements de faible densité. Il faut également considérer le fait que les peuplements initialement moins denses ont habituellement moins de ST résiduelle. L'effet d'une seule blessure a donc une influence plus grande sur le pourcentage de ST blessée observée.

Enfin, les peuplements moins denses sont aussi plus susceptibles d'avoir des structures irrégulières comprenant de très grosses tiges mélangées à de petites tiges. Lorsque coupées, les grosses tiges sont beaucoup plus difficiles à manipuler à travers les tiges résiduelles.

4.2.3. Présence de grosses tiges

Les tiges à gros houppiers, comme ceux des hêtres à grandes feuilles, sont ressorties comme source fréquente de blessures lors des discussions avec les industriels. Plus particulièrement dans les coupes progressives irrégulières, la présence de grosses tiges laissées sur pied lors de la première coupe d'ensemencement augmenterait les risques de blessures lors de la coupe suivante. En plus de devenir plus grosses, ces tiges, déjà plus difficiles à manipuler, représenteront un défi de taille lors de la coupe finale (ou de la deuxième coupe d'ensemencement), étant donné la régénération commerciale dense favorisée par l'ouverture du couvert, qui constituera un obstacle supplémentaire pour l'opérateur.



4.2.4. Présence d'obstacles

Les obstacles comme les grosses roches (*boulder*) et les pentes fortes forcent parfois les opérateurs à faire des manœuvres plus risquées et à dévier les sentiers de débardage, qui deviennent alors plus sinueux et irréguliers. Cela peut augmenter le risque de blessures aux tiges résiduelles à proximité des sentiers de débardage, selon les partenaires industriels.

4.2.5. Présence de petites tiges marchandes

Bien que les grosses tiges soient parfois une source de blessures, ce sont de loin les tiges résiduelles de faible diamètre qui subissent la plus grande quantité de blessures, selon les analyses statistiques de cette étude. Entre autres, cela peut s'expliquer par le fait que ces petites tiges sont plus susceptibles d'être renversées d'après les analyses des données des placettes-échantillons. De plus, des blessures de petite superficie suffisent pour endommager ces tiges en raison des critères d'évaluation du MRNF (Annexe A). Une autre explication ressortie des observations industrielles est qu'une partie de ces tiges correspond à des repousses présentes dans d'anciens sentiers de débardage fréquemment réutilisés pour des raisons opérationnelles.

4.2.6. Tiges résineuses

Même si cette étude a été effectuée dans des peuplements feuillus et mixtes, plusieurs industriels ont mentionné avoir des taux élevés de blessures dans des peuplements contenant des tiges résineuses à la suite d'une coupe partielle. Cette situation peut être attribuable au fait que les tiges résineuses de petite dimension peuvent être plus facilement classées comme blessées à la suite d'une écorchure au tronc (MRNF, 2024). En effet, d'après les critères du MRNF, une blessure de seulement 50 cm² décline le résineux blessé alors qu'il faut 30 cm de long sur un feuillu pour le déclasse. Les critères d'évaluation des blessures lors des suivis de conformité sont présentés à l'annexe A. Les petites tiges résineuses peuvent aussi entraver la visibilité des opérateurs en hiver, ce qui augmente le risque de blessures.

4.3. Planification et suivi des opérations forestières

4.3.1. Martelage non adapté

Le martelage a beaucoup été soulevé lors des discussions avec les industriels, même si celui-ci n'est pas ressorti comme un facteur statistiquement significatif compte tenu du niveau de détail et de la faible quantité de données disponibles. Actuellement, la sélection des tiges lors du martelage ne tient pas toujours compte des contraintes opérationnelles, ce qui force les opérateurs de machinerie à effectuer des manœuvres plus risquées ou plus complexes pour récolter ou préserver les tiges martelées. Cet enjeu est particulièrement courant lors du martelage positif, qui oblige l'opérateur à protéger une tige nuisant fortement à ses déplacements. Cette situation survient fréquemment lorsque le marteleur parcourt le peuplement selon une orientation différente de celle de l'opérateur de machinerie, qui doit tenir compte de l'orientation de la pente et des obstacles, comme les grosses roches.

4.3.2. Patrons de récolte imposés

Les patrons de coupe prescrits influencent beaucoup l'espace dont disposent les opérateurs pour manipuler les tiges abattues. De manière générale, des patrons de coupe offrant davantage d'espace pour les opérations, par exemple les coupes par trouées comme le jardinage par bouquets, sont moins susceptibles d'engendrer des blessures que des coupes nécessitant des passages répétés de la machinerie dans des endroits restreints, comme le jardinage par pied d'arbre (Nevill, 1997).



Certains patrons de récolte imposés, comme les lisières, demandent aux opérateurs d'être très méticuleux dans leurs manœuvres. D'après les discussions avec les industriels, seuls des opérateurs très expérimentés parviennent à limiter les blessures aux arbres résiduels dans des patrons de coupe en lisière à trois niveaux, comme les 5-7-5 (5 m de coupe totale – 7 m de coupe partielle – 5 m intacts) ou les 6-6-6. Ces patrons peuvent être très difficiles à respecter sur des terrains présentant beaucoup de contraintes opérationnelles. Dans ces situations, il arrive souvent que le respect du prélèvement se fasse au détriment des seuils de blessures à respecter.

4.3.3. Critères en conflit pour le respect de la prescription

Les opérateurs en forêt sont contraints de respecter plusieurs critères afin de respecter la prescription sylvicole planifiée. Toutefois, dans des secteurs avec beaucoup de contraintes opérationnelles, le succès d'un critère peut parfois entraîner l'échec d'un autre. Par exemple, des critères sont souvent mis en place pour sensibiliser l'opérateur à protéger les tiges de 10 cm à 22 cm de diamètre. Or, si un grand nombre de ces tiges sont positionnées près des sentiers de débardage prévus et que l'obstruction visuelle est élevée, le maintien d'une forte proportion de ces petites tiges augmentera le risque d'échec du critère relatif à la proportion maximale de tiges résiduelles blessées. Des exemples de critères communs en CPI sont disponibles à l'annexe B.

4.4. Réalisation des opérations forestières

4.4.1. Pourcentage de prélèvement en surface terrière

D'après les résultats statistiques obtenus à partir des données des SI fournies par les industriels, l'augmentation du pourcentage de ST récoltée semble augmenter la proportion en ST de tiges blessées. L'accrochage des tiges lors du débardage est également plus probable dans les procédés de récolte de bois en longueur. La CPI_RL présentait le plus fort pourcentage de ST récoltée parmi les traitements étudiés, ce qui pourrait expliquer en partie la proportion plus élevée de blessures observées dans les SI étudiés.

4.4.2. Récolte de tiges feuillus

Les blessures semblent principalement être causées par la récolte des feuillus, d'après les analyses statistiques de la présente étude. Ceux-ci ont généralement une cime plus large, ce qui rend les accrochages plus fréquents avec les tiges résiduelles lors de la récolte et le débardage. Lors des discussions avec les industriels, plusieurs ont mentionné les gros arbres fourchus comme source importante de blessures.

4.4.3. Suivi des opérations

Il est possible qu'une directive soit mal comprise par des opérateurs, ce qui peut entraîner une dérive de leur part dans l'exécution des travaux à mesure que la coupe progresse. Certains opérateurs ont également moins d'expérience que d'autres, ce qui nécessite un encadrement rapproché en début de chantier. Malheureusement, les placettes de suivi après coupe sont parfois réalisées trop longtemps après la coupe, ce qui ne permet pas de corriger les pratiques inadéquates à temps.

4.4.4. Procédé de récolte

Dans les résultats de cette étude, le procédé en bois long semble causer plus de blessures que le procédé de récolte en bois court. L'analyse des placettes et des traces GPS de machinerie a montré que les placettes situées à proximité de sentier de débardage présentaient significativement plus de ST de tiges blessées. Bien que l'abatteuse groupeuse utilisée dans le procédé en bois long offre une puissance et une capacité



supérieure pour orienter la chute des arbres coupés, le bois en longueur est plus difficile à manipuler lors du débardage, ce qui semble être la principale source de blessures (Picchio *et al.*, 2012). Comme l'opérateur doit transporter l'arbre entier à l'aire d'ébranchage dans ce procédé, les risques d'accrochage entre les grosses branches de la cime coupée et les tiges résiduelles en bordure de sentier seront plus élevés.

4.4.5. Répartition de la charge

Étant donné la mécanisation de plus en plus importante des opérations forestières, les sols forestiers doivent supporter des charges très élevées. Lorsque le poids de la machinerie se concentre sur un nombre limité de roues, cela entraîne rapidement de l'orniérage et augmente le potentiel de blessures aux racines des arbres. Il est bien documenté que la répartition de la charge des machines utilisées a une influence marquée sur les dommages au sol (Sutherland, 2006), mais qu'elle peut également avoir un impact sur les blessures de pied et de racine. Plusieurs méthodes, comme l'utilisation de chenilles, permettent de mieux répartir la charge, réduisant ainsi l'orniérage et le risque de blessures aux racines.

4.4.6. Passage de la machinerie sur d'anciens sentiers de débardage

Les anciens sentiers de débardage sont généralement réutilisés lors d'une deuxième passe de coupe partielle dans un scénario sylvicole pour des raisons opérationnelles, souvent dues à la présence de contraintes limitant la circulation de la machine. Comme mentionné précédemment, ces anciens sentiers sont parfois régénérés avec une dense strate de petites tiges marchandes. Celle-ci constitue un obstacle important pour les opérateurs, qui doivent éviter de blesser les tiges situées à proximité de l'abatteuse.



Figure 18. Exemple de blessure de pied et de racine sur un BOJ.

4.4.7. Superficie et espacement des sentiers de débardage

Les analyses de cette étude suggèrent qu'un pourcentage élevé de superficie occupée par les sentiers augmente les risques de blessures aux arbres. La littérature scientifique est généralement cohérente avec cette observation. Plus il y a de sentiers, plus les risques de blessures s'accroissent (Kizha *et al.*, 2021; Plamondon, 2006). L'espacement des sentiers de débardage peut notamment jouer un rôle important puisqu'il permet de diminuer le pourcentage de superficie occupée par les sentiers et, par conséquent, d'augmenter la superficie du peuplement non affectée par les risques de blessures pendant la récolte et le débardage. L'augmentation de l'espacement entre les sentiers n'est cependant pas toujours possible lorsque des patrons de coupe par bandes sont imposés. Dans tous les cas, un patron de sentier qui réduit la superficie occupée par la machinerie contribue à diminuer les blessures aux tiges résiduelles.

4.4.8. Localisation par rapport aux sentiers de débardage

Selon les résultats de cette étude, les tiges à proximité des sentiers de débardage semblent être plus blessées que celles situées à plus de 7 m de distance, ce qui suggère des accrochages lors du déplacement des tiges par l'abatteuse ou la débusqueuse. Les études de Kizha *et al.* (2021) et Lessard *et al.* (2021) ont identifié le débardage comme une source fréquente de blessures, en qualifiant les sentiers comme « zone de concentration des dommages ». À la suite des discussions, les industriels ont aussi fait part d'observations cohérentes avec la littérature. D'après eux, il est fréquent d'observer un plus haut taux de blessures en début



de sentier de débardage. Cela n'est pas surprenant, car près de la place de garde, les passages de la machinerie qui entre et sort du peuplement sont plus nombreux. Les résultats des analyses de cette étude n'ont cependant pas permis de confirmer cette tendance à l'échelle provinciale. Il est possible que le positionnement des placettes de suivi après coupe ait influencé les analyses, puisque certaines régions ont des ententes pour exclure la place de garde des suivis.

4.4.9. Courbures des sentiers de débardage

Bien que la courbure des sentiers ne soit pas ressortie comme un effet significatif dans cette étude, la proportion de ST blessée tend à augmenter lorsque la sinuosité des sentiers est plus élevée. L'augmentation du risque de frottement sur le tronc des tiges résiduelles lors du débardage a d'ailleurs été documentée dans la littérature (Naghdi *et al.*, 2019).

4.5. Facteur humain

Les facteurs humains n'ont pas pu être étudiés dans le présent projet de recherche faute de données. Cependant, l'unité d'aménagement est l'un des facteurs statistiquement significatifs qui influencent le plus les blessures aux arbres résiduels. Il existe donc des différences régionales considérables, qui interagissent avec l'emplacement et les pratiques des différents industriels. Cela suggère indirectement que la formation du personnel et la manière de gérer les coupes partielles propres à chaque industriel doivent être considérées pour limiter les blessures aux tiges résiduelles. Les facteurs humains ont également été soulevés par les experts industriels lors des discussions portant sur l'interprétation des résultats statistiques de l'étude.

4.5.1. Expérience des opérateurs

L'hypothèse de l'impact de l'expérience des opérateurs n'a pas pu être vérifiée dans cette étude, faute de données sur les opérateurs réalisant les travaux. Cependant, les coupes partielles en peuplements feuillus et mixtes sont des traitements plus difficiles à exécuter que les coupes totales, compte tenu des nombreuses contraintes à respecter. Un exemple fréquent de contrainte est la protection des tiges résiduelles de 22 cm de diamètre et moins dans des peuplements où plusieurs gros arbres doivent être récoltés. L'influence notable de l'expérience des opérateurs a été documentée à la fois dans la littérature scientifique et par les industriels lors des discussions.

D'après l'étude finlandaise de Sirén (2001), les opérateurs expérimentés causaient en moyenne des dommages sur 1,5 % à 2,2 % des tiges résiduelles, contre 4,9 % à 6,6 % pour les opérateurs inexpérimentés. Des études approfondies sur le profil des opérateurs en relation avec les tiges blessées après coupe permettraient de mieux comprendre l'impact humain au Québec. Les méthodes de transmission de l'expérience entre opérateurs constitueraient également une avenue de recherche intéressante.

4.5.2. Durée des quarts de travail

Il est déjà documenté dans la littérature que la concentration et la fatigue influencent les blessures aux arbres résiduels lors des opérations forestières (Bembenek *et al.*, 2020). Comme la réalisation de coupes partielles est beaucoup plus exigeante sur le plan cognitif avec la machinerie moderne, la fatigue cognitive liée à une durée cumulative des quarts de travail augmente les risques de blessures (Bembenek *et al.*, 2020). Une étude réalisée en Australie a d'ailleurs indiqué que cet effet augmenterait avec le nombre d'heures travaillées sans pause et serait accentué pendant les quarts de nuit (Nicholls *et al.*, 2004).



5. Recommandations opérationnelles

Les recommandations qui suivent sont basées sur les résultats statistiques de cette étude, l'interprétation de ces résultats lors de discussions avec les partenaires industriels du projet et une revue de littérature scientifique. Les symboles suivants représentent les sources principales d'information ayant permis de formuler chaque recommandation.



– Soutenues par les résultats du projet



– Soutenues par les observations d'industriels



– Soutenues par la littérature scientifique

5.1. Prioriser la récolte d'hiver

Principalement en raison de la fragilité de l'écorce avant le gel et durant la saison de croissance, la coupe d'hiver permet de réduire la quantité et la taille des blessures infligées aux arbres résiduels. Le couvert de neige offre une protection mécanique pour le pied et les racines. De plus, l'obstruction visuelle causée par le feuillage des gaules est nettement réduite, ce qui facilite les manœuvres de l'opérateur.

5.2. Prioriser la récolte de jour

Selon la littérature, réaliser les opérations de jour offre des conditions d'éclairage naturel optimales, ce qui peut diminuer les risques de blessures aux arbres résiduels (Bembenek *et al.*, 2020). Lorsque cela n'est pas possible, il faut fournir un éclairage artificiel bien adapté à la vue de l'opérateur. La possibilité d'ajuster l'intensité lumineuse, combinée à un éclairage périphérique, permet d'obtenir des conditions de visibilité optimales.

5.3. Devancement de la coupe finale

Dans un régime de coupes progressives, le devancement de la coupe finale ou d'une seconde coupe d'ensemencement peut contribuer à limiter les blessures aux arbres résiduels en maintenant la régénération à un stade moins développé. Une régénération de moins de 3 m réduit l'obstruction visuelle pour les opérateurs, ce qui peut favoriser des déplacements plus précis ainsi qu'une diminution des contacts avec les tiges résiduelles. À l'inverse, une régénération dense et plus haute augmente les risques de frottement, d'écrasement ou de déviation des équipements (Lee *et al.*, 2024). Le devancement de la seconde coupe peut également permettre de mieux protéger les îlots de régénération, qui seront plus petits et moins endommagés par les déplacements de la tête d'une abatteuse, puisque celle-ci ne peut se soulever suffisamment haut pour protéger la haute régénération.

Plusieurs études sur les coupes progressives ont présenté des résultats prometteurs sur le succès de la régénération lorsque la seconde coupe d'ensemencement ou la coupe finale sont réalisées de cinq à quinze ans après la première coupe d'ensemencement (Prévost et Charette, 2019; Prévost et DeBlois, 2014; Prévost et Gauthier, 2013). Ces études ont démontré qu'il est possible de devancer la seconde coupe tout en limitant la compétition de feuillus intolérants à l'ombre comme le peuplier faux-tremble. Le but premier du devancement est donc de maintenir la régénération à un stade compatible avec les opérations, puisque des délais trop longs favorisent une fermeture du sous-étage et une augmentation des risques de blessures aux tiges marchandes et aux tiges en régénération lors des coupes subséquentes.



5.4. Abattage directionnel et angle par rapport au sentier

D'après les discussions avec les industriels et la littérature scientifique, il est recommandé d'abattre les tiges parallèlement les unes aux autres, selon un patron en chevron, afin de limiter les dommages aux tiges résiduelles (Van der Hout, 2014). Le gros bout des tiges abattues devrait se retrouver près du sentier de débardage (Figure 19) et être orienté selon un angle favorable afin de réduire le fauchage et de faciliter les manipulations du débardeur, et, par conséquent, diminuer les risques de blessures. Cette mesure s'applique surtout aux abatteuses munies d'une tête à scie, comme les abatteuses groupeuses.

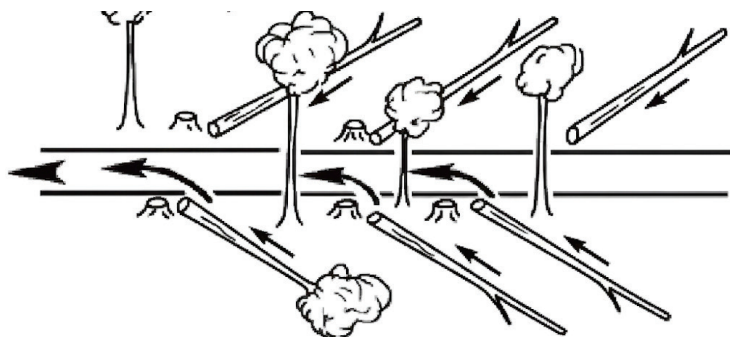


Figure 19. Illustration du patron de coupe en chevron. Inspirée de Van der Hout (2014).

5.5. Positionnement des empilements

Afin de faciliter le débardage des tiges tronçonnées en procédé de bois court, les empilements devraient être positionnés de biais par rapport au sentier, selon un angle aigu (Lessard *et al.*, 2021). Cela permet d'éviter des manœuvres plus contraignantes pour le débardeur, qui devra effectuer un virage plus large et qui risque ainsi de balayer la régénération et les arbres résiduels à proximité des empilements et du sentier (Figure 20). Les empilements devraient également être positionnés le plus près possible du sentier, de façon à réduire au maximum la distance parcourue hors sentier par le débardeur.

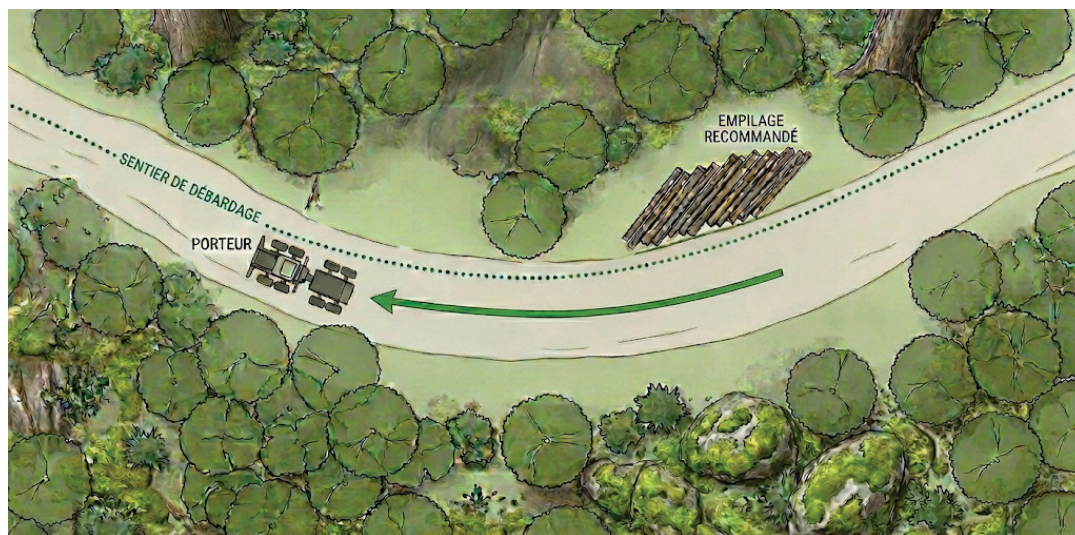


Figure 20. Illustration du positionnement de biais des tiges coupées afin de faciliter leur transport jusqu'au chemin.



5.6. Coupe en hauteur

La coupe en hauteur se fait plus facilement avec une abatteuse multifonctionnelle, qui permet de mesurer une longueur du tronc de l'arbre à abattre avant de la couper. Il est cependant possible de favoriser cette pratique avec tout type d'abatteuse mécanisée si la fin de la dernière bille commerciale d'un arbre est à portée de la machine. Dans le cas contraire, une estimation qui n'est pas suffisamment précise pour effectuer la première découpe peut entraîner la perte d'une bille trop courte pour le sciage ou encore le gaspillage de bois relié à la surlongueur de la bille (Figure 21). Cette pratique permet néanmoins d'utiliser la force de l'inertie et le moment de la chute pour approcher la tige de la machine avant que la cime ne touche le sol, diminuant du même coup sa longueur de traînage sur le sol. Cela réduit notamment les dommages à la régénération près du sol et les risques d'accrochage avec les tiges matures debout.

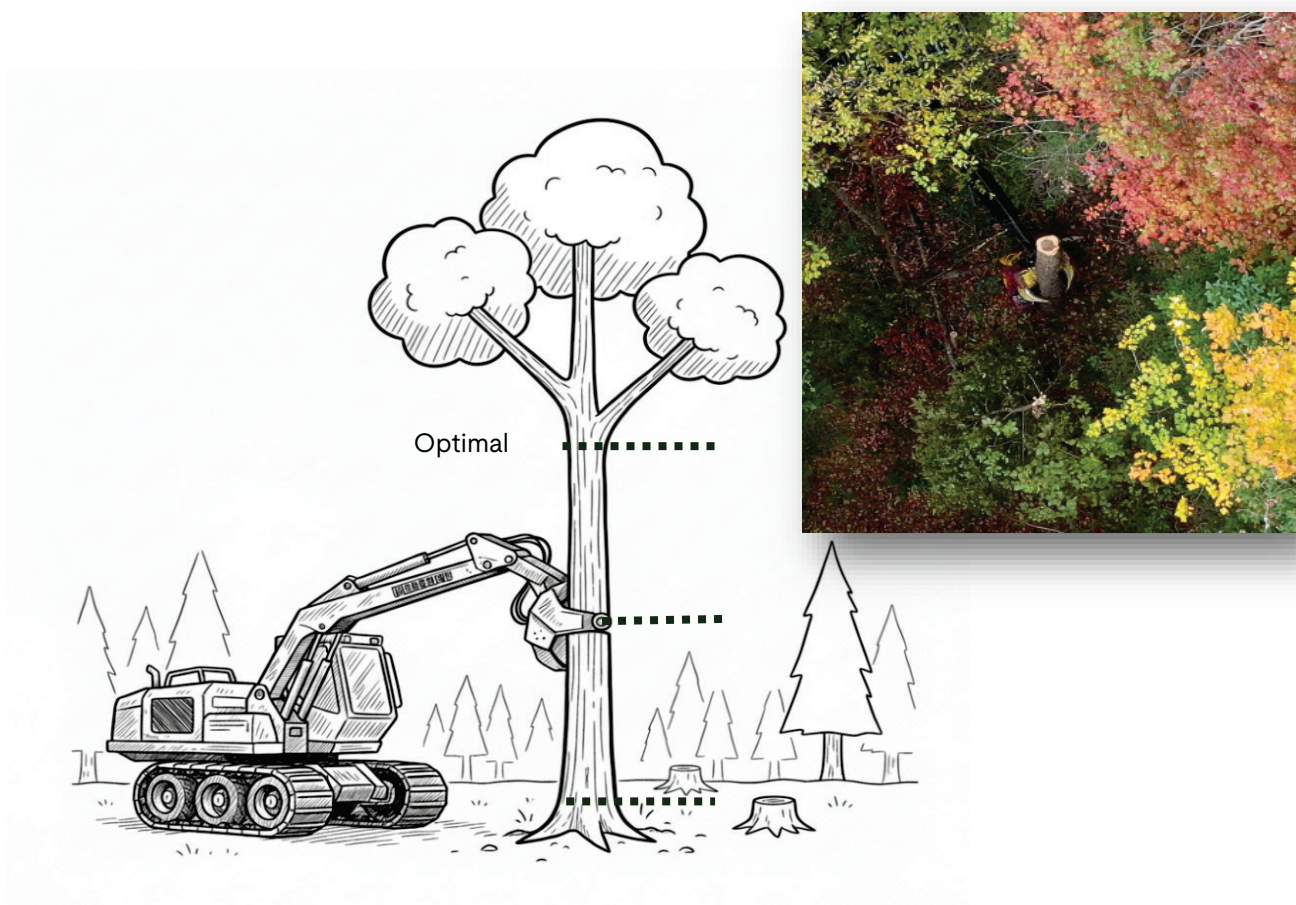


Figure 21. Principe de coupe en hauteur. Photographie prise par le CERFO (2022).

À l'issue de discussions avec des experts industriels, il a également été mentionné que la coupe en hauteur permettait de réduire les cassures sur la bille de pied coupée en réduisant préalablement la masse située au-dessus du trait de scie. Étant donné que la bille de pied est généralement celle qui a le plus de valeur sur un arbre, prendre davantage de temps pour en préserver la qualité peut s'avérer rentable. Cette pratique mériterait d'être davantage étudiée afin d'évaluer dans quelle mesure ses impacts positifs compensent la perte de productivité.



5.7. Ébranchage sur place

En procédé de bois en longueur, les branches commerciales et les fourches des plus gros arbres peuvent être tronçonnées au sol sur le lieu d'abattage, diminuant ainsi les risques de blessures lors du débardage. Plusieurs opérateurs appliquent déjà cette pratique, selon les industriels interrogés dans le cadre de la présente étude.

5.8. Arbre protecteur dans les courbes de sentier

Certains industriels utilisent un arbre protecteur afin de protéger les autres arbres à risque d'être accrochés à l'intérieur d'une courbure de sentier. Ainsi, l'arbre protecteur sera le seul à subir les accrochages durant le débardage du bois vers le chemin principal. Il peut être récolté au dernier passage de l'abatteuse. Si l'arbre protecteur n'est pas récolté, il sera fort probablement déclaré comme blessé. Néanmoins, il aura tout de même permis de protéger plusieurs autres tiges d'avenir qui maintiendront leur croissance et leur vigueur. Étant donné qu'il peut être difficile sur le plan logistique d'aller récolter des arbres protecteurs isolés, certains industriels privilégient plutôt des essences sans preneurs, de faible valeur ou alors des arbres de faible qualité. Cela permet de concentrer les dommages sur des arbres résiduels moins pénalisants d'un point de vue financier ou d'un point de vue réglementaire lors de la vérification exigé par le MRNF. Plusieurs industriels ont mentionné avoir recours à cette pratique lors des discussions, ce qui expliquerait les taux de ST blessée du hêtre à grande feuille (HEG) plus élevés que pour les autres essences observées dans cette étude. Le HEG, étant particulièrement affecté par la maladie corticale du hêtre, produit des billes de moins bonne qualité en moyenne (Kish *et al.*, 2022) et est moins pénalisant lorsqu'endommagé dans plusieurs régions.

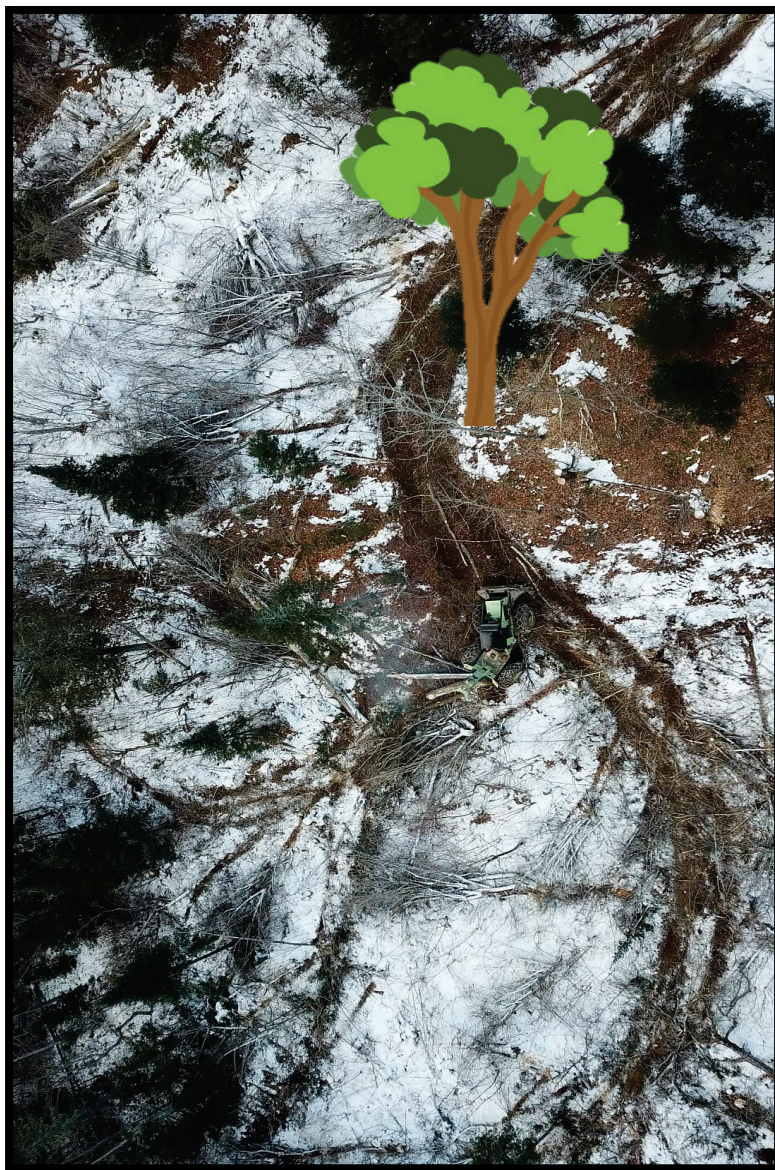


Figure 22. Schéma présentant un arbre protecteur à l'intérieur d'une courbe de sentier de débardage. Photographie prise par le CERFO (2022).



5.9. Répartition de la charge

Il est recommandé d'équiper la machinerie lourde de chenilles afin de répartir la charge sur une plus grande surface de contact, ce qui contribue à limiter l'orniérage ainsi que les blessures de pied ou de racine (Figure 23). Bien que les blessures de racine ne soient pas les plus fréquentes, les chenilles permettent également de réduire les dommages au sol (Sutherland, 2006).

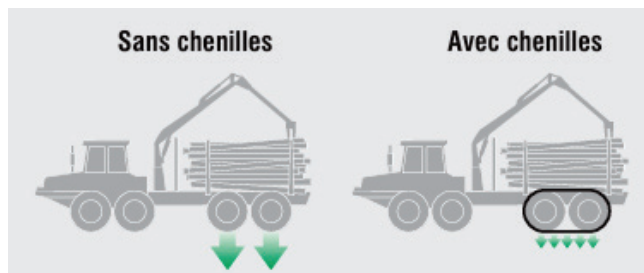


Figure 23. Illustration de la répartition de la charge sur une plus grande superficie, avec et sans chenilles.

5.10. Améliorer la visibilité

Comme mentionné dans l'étude de Bembenek *et al.* (2020), la tombée de la nuit entraîne une visibilité réduite, de l'ombre et de l'éblouissement, ce qui augmente significativement la fréquence des blessures aux tiges résiduelles. Des systèmes intelligents d'éclairage périphérique pourraient s'avérer très efficaces pour optimiser la luminosité dans l'entièreté du champ de vision de l'opérateur.

Au besoin, des incitatifs pour le port de lunettes de sécurité ajustées à la vue des opérateurs seraient un investissement très rentable si cela permet d'éviter des accrochages.

5.11. Récolte des grosses tiges lors de la première passe

La plupart des grosses tiges, souvent appelées « DOR », devraient être récoltées en priorité lors de la première passe de la coupe progressive. Lorsque les plus grosses tiges sont conservées jusqu'à la deuxième passe, il devient presque impossible d'éviter l'accrochage de la régénération commerciale plus dense, qui aura été stimulée par l'ouverture du couvert.

5.12. Martelage adapté aux contraintes opérationnelles

Les marteleurs doivent bien comprendre les contraintes opérationnelles auxquelles les opérateurs sont confrontés afin d'adapter la sélection des tiges aux possibilités réelles de protection des arbres résiduels. Le parcours des marteleurs devrait également tenir compte des courbes de niveau et de l'orientation prévue des sentiers de débardage.

De manière générale, parcourir le peuplement perpendiculairement aux courbes de niveau lors du martelage permet de mieux reproduire le trajet de la machinerie et de mieux visualiser les contraintes opérationnelles. Il serait par ailleurs bénéfique que les marteleurs disposent d'une estimation de l'emplacement des futurs sentiers qui seront empruntés par les abatteuses et les débardeurs.



Sur les terrains plus à risque, le martelage négatif devrait être privilégié. Selon les industriels consultés, le martelage positif est souvent plus difficile à appliquer, puisqu'il arrive fréquemment que des tiges à protéger se retrouvent à des endroits qui nuisent fortement au déplacement de la machinerie.

5.13. Espacement des sentiers de débardage

Augmenter et uniformiser l'espacement des sentiers de débardage permet de diminuer la superficie occupée par ces derniers, laquelle a un impact significatif sur la ST de tiges blessées selon les analyses statistiques. De plus, un réseau de sentiers moins dense augmente la proportion de placettes de suivi après coupe situées loin des sentiers, où les analyses ont révélé une plus faible fréquence de blessures.

5.14. Sentiers rectilignes

Dans la mesure du possible, les sentiers de débardage devraient être planifiés de manière à être le plus rectilignes possible, tout en prenant en considération les contraintes opérationnelles telles que la pente et les gros blocs rocheux à contourner. Des sentiers rectilignes et uniformément distancés permettent généralement de réduire la superficie occupée par ces derniers. D'après les analyses, une réduction de la superficie occupée par les sentiers diminue significativement la proportion de ST résiduelle blessée.

5.15. Patrons de coupe offrant plus de marge de manœuvre

Dans les secteurs d'intervention les plus contraignants, il est recommandé de privilégier des patrons de coupe partielle offrant plus d'espace pour les opérations. Les coupes par trouées ou par bouquets sont de bons exemples de patrons de coupe partielle qui augmentent l'espace disponible pour les déplacements de la machinerie et facilitent la protection des tiges résiduelles lors de la récolte.

5.16. Adaptation des critères d'évaluation

Les résultats statistiques de cette étude ont notamment démontré que les petites tiges marchandes étaient largement plus affectées à la suite des opérations de coupe partielle. Celles situées à proximité des sentiers sont encore plus touchées par ce problème. Pour tenir compte des réalités opérationnelles, il serait pertinent d'offrir plus de marge de manœuvre aux opérateurs pour la récolte de petites tiges situées à proximité des sentiers de débardage, tout en conservant des critères stricts sur la superficie occupée par ces sentiers. Cela permettrait d'éviter de laisser un grand nombre de petites tiges blessées, qui perdront en qualité, tout en limitant les risques de dommages à la régénération et aux sols associés à une augmentation de la superficie occupée par les sentiers.

Le seuil de 10 % fixé par le MRNF pourrait être ajusté en fonction des conditions de terrain, notamment lorsqu'un traitement implique de manipuler de grosses tiges feuillues au travers de petites tiges marchandes. Il serait par ailleurs intéressant de considérer les autres facteurs aggravants mentionnés dans la présente étude dans l'établissement du seuil, par exemple les peuplements avec de grosses tiges feuillues, les peuplements moins denses avec une forte présence de gaules, les peuplements traités avec un fort prélèvement et ceux présentant des contraintes opérationnelles élevées selon les critères du RATF. Avec près de 85 % des SI qui respectent le seuil de 10 % de ST résiduelle blessée, il semble que celui-ci soit adéquat pour la plupart des sites. L'adoption d'un seuil variable, ajusté selon la complexité écologique et opérationnelle du site, permettrait de distinguer les situations où les dommages sont difficilement évitables de celles où ils résultent d'un manque de rigueur, assurant ainsi une évaluation plus équitable et représentative de la performance des intervenants.



5.17. Respect du taux de récolte 📊

D'après les analyses des données à l'échelle du SI, les blessures aux tiges résiduelles augmentent généralement avec l'intensité du prélèvement en ST. Dans la mesure du possible, éviter de dépasser le prélèvement prescrit en ST permet donc de limiter les risques de blessures.

5.18. Suivi rapproché et formation des opérateurs 👤

Il est essentiel de ne pas attendre la fin des travaux pour évaluer la qualité de l'exécution de la coupe. Cette recommandation est particulièrement importante lorsque l'opérateur possède peu d'expérience en coupe partielle. Une rétroaction rapide en début de chantier permet de corriger les pratiques inadéquates avant qu'elles ne se répètent à grande échelle. Dans les secteurs où les contraintes opérationnelles sont élevées, il peut également être avantageux de jumeler des opérateurs moins expérimentés à des opérateurs chevronnés afin de favoriser le transfert de connaissances et l'adoption de bonnes pratiques. Par ailleurs, l'effet significatif de l'unité d'aménagement sur le pourcentage de blessures observé suggère que les méthodes de travail et la formation du personnel d'une organisation peuvent avoir un impact important sur les taux de blessures observées. L'étude de Kizha *et al.* (2021) ainsi que celle de Proto *et al.* (2026) suggèrent également la mise en place d'un programme de sensibilisation combiné à des incitatifs financiers pour encourager les opérateurs à adopter de saines pratiques limitant les dommages mécaniques aux tiges résiduelles. Bien que l'efficacité de telles mesures n'ait pas encore été démontrée de manière robuste dans la littérature scientifique, leur potentiel mérite d'être considéré.

5.19. Quarts de travail 📅

En coupe partielle, les opérateurs doivent constamment prendre des décisions importantes afin de respecter les diverses contraintes réglementaires, économiques et opérationnelles qui leur sont imposées. Ce travail demande beaucoup de concentration, laquelle peut être rapidement affectée par la fatigue. D'après la littérature scientifique, il est recommandé aux opérateurs de prendre une pause d'environ 10 minutes toutes les deux heures de travail, ainsi qu'une pause d'au moins 30 minutes toutes les 4 heures (Kirk, 1998; Nicholls *et al.*, 2004). Les pauses devraient servir à sortir de la cabine pour se dégourdir, diminuant ainsi la monotonie de la tâche. Il est à noter que la fatigue des opérateurs s'accumule plus rapidement lorsque la visibilité est faible, notamment lors des travaux de nuit ou dans une régénération dense en sous couvert. Cette fatigue, combinée à une diminution de la qualité de la perception visuelle, réduit la précision des opérations, ce qui est susceptible d'augmenter les dommages aux arbres résiduels en coupe partielle.

5.20. Poursuivre l'étude en peuplements résineux 📊 👤

Plusieurs industriels consultés dans le cadre de cette étude ont mentionné observer davantage de blessures dans les peuplements résineux. Il serait donc pertinent de poursuivre les travaux dans ce type de couvert.



6. Résumé des sources de blessures et recommandations

Les analyses et les discussions avec les industriels montrent que les blessures aux tiges résiduelles résultent d'un ensemble de conditions opérationnelles, écologiques et organisationnelles qui interagissent entre elles. Les facteurs les plus déterminants sont l'intensité de récolte, particulièrement la surface terrière feuillue prélevée, le procédé de récolte, la saison des opérations ainsi que la densité et la complexité structurale des peuplements. Les conditions de terrain, telles que la présence de blocs rocheux, les pentes, la régénération dense et les houppiers volumineux, amplifient les risques d'accrochage et de frottement. Ces contraintes deviennent encore plus importantes lorsque les travaux sont réalisés par des opérateurs moins expérimentés.

Pour réduire efficacement ces blessures, les recommandations prioritaires s'adressent directement aux planificateurs et aux industriels. Elles consistent notamment à favoriser la récolte hivernale, à maintenir des sentiers rectilignes et suffisamment espacés, à récolter les grosses tiges dès les premières passes, à orienter l'abattage en angle par rapport aux sentiers et à adapter le martelage aux contraintes réelles du terrain. Les industriels et le MRNF s'entendent également sur l'importance d'un suivi rapproché des travaux en cours d'opération et de la formation continue des opérateurs, les facteurs humains semblant jouer un rôle important dans l'apparition blessures aux arbres résiduels. Les recommandations de cette étude formulées à l'échelle provinciale sont résumées par grandes catégories dans le tableau 7. Certaines peuvent apparaître à plusieurs reprises lorsqu'elles permettent d'atténuer plusieurs sources de blessures.

Tableau 7. Résumé des principales sources de blessures et des recommandations qui leur sont associées.

Grande catégorie de conditions aggravantes pour le risque de blessures	Sources spécifiques de blessures (section 4)	Recommandations associées (section 5)
Conditions temporelles	Écorce fragile durant les saisons de croissance (4.1.1) Période de la journée aggravant la visibilité (4.1.2) Délai entre la première coupe et la coupe finale (4.1.3)	Prioriser la récolte d'hiver pour protéger l'écorce et les racines (5.1) Prioriser la récolte de jour pour améliorer la précision de l'opérateur (5.2) Devancer la coupe finale de 5 à 15 ans après la coupe d'ensemencement (5.3) Assurer une visibilité optimale par un éclairage intelligent et le port de lunettes ajustées (5.10)
Structure et composition du peuplement	Pourcentage de prélèvement en ST élevé (4.4.1) Obstruction visuelle causée par une régénération dense (4.2.1) Lien entre la faible densité et la structure complexe du peuplement (4.2.2)	Devancer la coupe finale de 5 à 15 ans après la coupe d'ensemencement (5.3) Récolte des grosses tiges prioritaires lors de la première passe en coupe progressive (5.11) Patrons de coupe offrant une marge de manœuvre à l'opérateur lorsqu'il y a des obstacles (5.15)



	Présence de grosses tiges à large houppier difficiles à manipuler (principalement feuillus) (4.2.3) Forte densité de petites tiges marchandes (10-22 cm) plus susceptibles d'être blessées (4.2.5) Déclassement plus facile des tiges résineuses (4.2.6) Récolte de tiges feuillues (4.4.2)	Adaptation des seuils d'évaluation selon les conditions de terrain (5.16) Respect du taux de récolte (5.17) Poursuivre les recherches du peuplement résineux (5.20)
Planification et encadrement des travaux	Martelage non adapté aux contraintes opérationnelles (4.3.1) Patrons de récolte stricts (ex. : lisières alternant entre coupe partielle et protection intégrale) (4.3.2) Critères de respect de la prescription en conflit (4.3.3) Présence d'obstacles et de contraintes limitant les déplacements de la machinerie (4.2.4) Passage de la machinerie sur d'anciens sentiers remplis de petites tiges (4.4.6)	Récolte de grosses tiges prioritaires lors de la première passe en coupe progressive (5.11) Martelage qui vise des tiges plus faciles à protéger selon les contraintes opérationnelles, la topographie et la précision de la machinerie (5.12) Patrons de coupe moins difficiles pour laisser plus de place à l'opérateur lorsqu'il y a des obstacles (5.15) Adaptation des seuils d'évaluation selon les conditions de terrain (5.16)
Logistique de récolte et aménagement des sentiers sur le chantier	Manque de suivi des opérateurs (4.4.3) Utilisation du procédé de bois long (4.4.4) Espacement de la superficie des sentiers d'abattage ou de débardage (4.4.7) Proximité des sentiers de débardage (4.4.8) Courbure excessive des sentiers (4.4.9)	Abattage directionnel à bon angle par rapport au sentier (5.4) Positionner les empilements de biais par rapport au sentier de débardage (5.5) Coupe en hauteur pour limiter l'envergure de la cime coupée (5.6) Ébranchage des fourches et des grosses branches sur le parterre de coupe en procédé de bois long (5.7) Garder un arbre protecteur à l'intérieur des courbes de sentier (5.8) Augmenter l'espacement entre les sentiers (5.13) Planifier des sentiers plus rectilignes (5.14) Suivi des opérateurs et rétroaction avant la fin des travaux (5.18)



Optimisation de la machinerie	Éclairage difficile de nuit (4.1.2) Lourde charge de la machinerie concentrée sur une faible surface de contact avec le sol (4.4.5)	Utilisation de chenilles sur la machinerie lourde pour mieux répartir la charge et limiter les blessures de racine (5.9) Assurer une visibilité optimale par un éclairage intelligent et le port de lunettes ajustées (5.10)
Facteurs humains	Expérience des opérateurs (4.5.1) Fatigue et baisse de concentration des opérateurs (4.5.2)	Suivi des opérateurs et rétroaction avant la fin des travaux (5.18) Formation et accompagnement en début de chantier (5.18) Incitatifs financiers (5.18) Permettre une pause de 10 minutes toutes les 2 heures et de 30 minutes toutes les 4 heures (5.19)

Bien que la présente étude se concentre sur les peuplements feuillus et mixtes, les partenaires industriels ont souligné que les peuplements résineux présentent eux aussi des enjeux importants, notamment en raison de critères de déclaration plus stricts et d'une visibilité souvent réduite. De même, le facteur humain, bien documenté dans la littérature scientifique mais peu étudié au Québec faute de données, apparaît comme un levier majeur d'amélioration. Ces deux dimensions mériteraient d'être approfondies dans de futurs travaux afin de compléter le portrait provincial et de soutenir l'optimisation des pratiques en coupe partielle.



Références

- Bembenek, M., Tsioras, P. A., Karaszewski, Z., Zawieja, B., Bakinowska, E. et Mederski, P. S. (2020). Effect of Day or Night and Cumulative Shift Time on the Frequency of Tree Damage during CTL Harvesting in Various Stand Conditions. *Forests*, 11(7), 743. <https://doi.org/10.3390/f11070743>
- Bloin, P., Mazerolle, M. J. et Hébert, C. (2022). Effects of the seasonal availability of freshly cut logs and tree species on the early response of saproxylic insects in boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 511, 120114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120114>
- Brooks, M. E., Kristensen, K., Benthem, K. J., van Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Mächler, M. et Bolker, B. M. (2017). glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9(2). <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Danneyrolles, V., Dupuis, S., Boucher, Y., Laflamme, J., Fortin, G., Leroyer, M., Terrail, R., Bergeron, Y. et Arseneault, D. (2020). Utilisation couplée des archives d'arpentage et de classification écologique pour affiner les cibles de composition dans l'aménagement écosystémique des forêts tempérées du Québec. *Mémoire de recherche forestière*, 183.
- Grzywiński, W., Turowski, R., Naskrent, B., Jelonek, T. et Tomczak, A. (2019). The Effect of Season of the Year on the Frequency and Degree of Damage during Commercial Thinning in Black Alder Stands in Poland. *Forest*, 10(8), 668. <https://doi.org/10.3390/f10080668>
- Hwang, K., Han-Sup, H., Marshall, S. E. et Page-Dumroese, P. (2018). Amount and Location of Damage to Residual Trees from Cut-to-Length Thinning Operations in a Young Redwood Forest in Northern California. *Forest*, 9(6), 352. <https://doi.org/10.3390/f9060352>
- Kirk, P. (1998). *The impact of shift length on processor operator fatigue* (Vol. 23, no. 18). Liro Forestry Solutions.
- Kish, R., James, P. M. A., Mariani, R. O., Schurman, J. S., Thomas, S. C., Young, E. N. et Martin, A. R. (2022). Beech Bark Disease in an Unmanaged Temperate Forest: Patterns, Predictors, and Impacts on Ecosystem Function. *Frontiers in Forest and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.831663>
- Kizha, A. R., Nahor, E., Coogen, N., Louis, L. T. et George, A. K. (2021). Residual Stand Damage under Different Harvesting Methods and Mitigation Strategies. *Sustainability*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147641>
- Lee, E., Lee, S.-T., Mun, H.-S., Chung, S. et Oh, J.-H. (2024). Assessing the Residual Stand Damage after Thinning with Different Levels of Mechanization. *Forests*, 15(5), 794. <https://doi.org/10.3390/f15050794>
- Lessard, G., Joanisse, G., Morin, F., Canuel, C.-M. et Marchal, J. (2021). *Documentation de l'enjeu « Impact de la machinerie forestière de récolte sur la régénération et les sols » dans les traitements de coupes partielles de l'Outaouais* (rapport final 2022-24). Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.
- Lundberg, S. et Lee, S.-I. (2017). *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions* (Version 2). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1705.07874>
- Marcilio, W. E. et Eler, D. M. (2020). From explanations to feature selection: Assessing SHAP values as feature selection mechanism. *2020 33rd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, 341-347. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI51738.2020.00053>



- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (2011). *Instructions relatives à l'application de l'arrêté ministériel sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits : Exercices 2013-2013*. Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers.
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2024). *Critères à respecter durant les suivis de conformité des traitements sylvicoles commerciaux du programme d'investissement pour l'aménagement des forêts*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Naghdi, R., Solgi, A., Zenner, E. K. et Tsioras, P. A. (2019). Effect of skid trail curvature on residual tree damage. *Australia Forestry*, 82(1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1563947>
- Nash, M., Napper, C., Page-Dumroese, D. S., Alger, R., Wagenbrenner, J., Tirocke, J. M., Amman, A., Courtney, A. et Griesl, J. (2020). *Winter logging for mechanical harvesting and fuel treatment operations* (rapport 2025-2806-NTDP). U. S. Department of Agricultural, Forest Service, National Technology and Development Program. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/62108>
- Neat, A. A. et Cavanaugh, J. E. (2012). The Bayesian information criterion: Background, derivation, and applications. *WIREs Computational Statistics*, 4(2), 199-203. <https://doi.org/10.1002/wics.199>
- Neville, R. J. (1997). *Aperçu des blessures des arbres* (notes de transfert technologique no 3). Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. https://publications.gc.ca/collections/collection_2012/rncan-nrcan/Fo29-47-3-1997-fra.pdf
- Nicholls, A., Bren, L. et Humphreys, N. (2004). Harvester Productivity and Operator Fatigue: Working Extended Hours. *International Journal of Forest Engineering*, 15(2), 57-65. <https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702497>
- Picchio, R., Magagnotti, N., Sirna, A. et Spinelli, R. (2012). Improved winching technique to reduce logging damage. *Ecological Engineering*, 47, 83-86. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.037>
- Picchio, R., Mederski, P. S. et Tavankar, F. (2020). How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? *Current Forestry Reports*, 6, 115-128. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>
- Plamondon, J. A. (2006). *Optimizing the results of HPRS: Best practices guide* (Advantage, vol. 7, no 6). FERIC.
- Prévost, M. et Charette, L. (2019). Shelterwood cutting in a boreal mixedwood stand: 5-years effects of the final cut on development of aspen suckers and released conifers. *The Forestry Chronicle*, 95(2), 113-123. <https://doi.org/10.5558/tfc2019-018>
- Prévost, M. et DeBlois, J. (2014). Shelterwood cutting to release coniferous advance growth and limit aspen sucker development in a boreal mixedwood stand. *Forest Ecology and Management*, 323, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.015>
- Prévost, M. et Gauthier, M.-M. (2013). Shelterwood cutting in a red spruce – balsam fir lowland: Effects of final cut on water table and regeneration development. *Forest Ecology and Management*, 291, 404-416. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.019>
- Proto, A. R., Stoilov, S. et Borz, S. A. (2026). Study of Residual Stand Damages During Sledge Yarding Extraction. *Forests*, 17(5), 603. <https://doi.org/10.3390/f17050603>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* [Logiciel].
- Ramantswana, M., Guerra, S. P. S. et Ersson, B. T. (2020). Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: A Review. *Current Forestry Reports*, 6(2), 143-158. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>



- Silversides, C. (1984). Mechanized forestry, World War II to the present day. *The Forestry Chronicle*, 60(4), 231-235.
- Sirén, M. (2001). Tree Damage in Single-Grip Harvest Thinning Operations. *International Journal of Forest Engineering*, 12(1). <https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/30034>
- Sullivan, E. (2022). Understanding from Machine Learning Models. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 73(1), 109-133. <https://doi.org/10.1093/bjps/axz035>
- Sutherland, B. (2006). *La prévention des dommages au sol en forêt boréale et acadienne dans l'est du Canada* (Advantage, vol. 6, no 27). FERIC.
- Van der Hout, P. (2014). *Code of Practice for Forest Operations for Timber Sales Agreement and Wood cutting Licence Holders* (3e éd.). Guyana Forestry Commission.
- White, J. C., Arnett, J. T. T. R., Wulder, M. A., Tompalski, P. et Coops, N. C. (2015). Evaluating the impact of leaf-on and leaf-off airborne laser scanning data on the estimation of forest inventory attributes with the area-based approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(11), 1 498-1 513. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0192>



Annexes

Annexe A. Critères d'évaluation d'une blessure lors des suivis de conformités

Critères d'évaluation d'une tige pour déclarer une blessure (MRNF, 2024).

Siège de la blessure			Groupe d'essences	Dimension ou description		
				Largeur (ou nombre de faces)	Hauteur (ou longueur)	
Houppier	Cime		Feuillus	Tête cassée > 20 cm de diamètre à la base, située au-dessus de la zone d'embranchement des branches charpentières		
			Pins rouges ou blancs	Tête cassée > 20 cm de diamètre à la base		
			Autres résineux	Tête cassée > 10 cm de diamètre à la base		
	Branches		Résineux	Branches supprimant ≥ 50 % de la proportion du houppier vivante d'origine		
	Branche secondaire		Feuillus	Branche secondaire supprimant ≥ 50 % du houppier vivante d'origine		
	Branche primaire arrachée			Avec blessure à la tige principale		
	Sous le houppier		Toutes les essences	Arbre à la tige principale unique ou multiple dont l'une des tiges est sous le houppier		
Pied et tige principale (aubier exposé)			Toutes les essences	≥ 1 face		
			Feuillus	≤ 1 face	Longueur > 30 cm	
			Pins rouges ou blancs		Longueur ≥ au DHP de l'arbre évalué	
			Autres résineux		Blessures de ≥ 50 cm²	
Racine	Racine principale : ½ cassée (fibre éclatée) ou totalement cassée	1 racine	Toutes les essences			
	Racine secondaire (totalement cassée)			> 1 face		
Arbre penché ou rabattu						



Exemple de critères d'évaluation en coupe partielle (MRNF, 2011).

Critères d'évaluation	Indicateur	Méthode de mesure	Cible (seuil, intervalle)
Respect du prélèvement cible	Surface terrière		+ ou - 5 %
Respect des priorités de récolte	Surface terrière des tiges récoltées		85 % - 115 % * * avec une marge de manœuvre d'une classe de DHP
Tiges qui n'étaient pas à récolter, mais qui ont été coupées ou renversées	Nbr de tiges à l'hectare de diamètre 10 à 22 cm		Max. 25 % du nombre total des tiges de 10 à 22 cm avant coupe.
Tiges blessées	Surface terrière des tiges blessées		Max. 10 %, en ST, de tiges blessées.



Annexe B. Exemple de critères d'évaluation après traitement dans une coupe progressive irrégulière (MRNF, 2024)

Critères généraux après traitement

- a) La superficie traitée est incluse dans le secteur d'intervention inscrit dans la prescription sylvicole.
- b) Le prélèvement doit respecter la proportion de surface terrière totale inscrite dans la prescription sylvicole.
- c) Le prélèvement doit respecter le martelage et/ou les directives opérationnelles en matière de sélection d'arbres.
- d) La proportion de la surface terrière des arbres blessés de classe de diamètre supérieur ou égal à 10 cm ne doit pas excéder celle inscrite dans la prescription sylvicole. Il est recommandé de calculer cette proportion sur la totalité des arbres résiduels de classe de diamètre supérieure ou égal à 10 cm, toutes les essences et classes de vigueur confondues.
- e) Si cela s'avère nécessaire, dans le cas des arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine est inférieur à 24 cm, la proportion d'arbres non martelés, coupés ou renversés ne doit pas excéder celle inscrite dans la prescription sylvicole. Cette proportion est calculée sur le nombre total d'arbres des classes de diamètre de 10 à 22 cm.

Trouées et bandes

- f) Les trouées ou les bandes doivent être installées aux endroits indiqués et occuper la proportion du secteur d'intervention inscrite dans la prescription sylvicole.
- g) Chacune des trouées ou des bandes doit avoir la superficie et les dimensions inscrites dans la prescription sylvicole.



Annexe C. Données disponibles à l'échelle du secteur d'intervention et de la placette

Données provenant des rapports annuels techniques et financiers (RATF), de la cartographie lidar et de la carte écoforestière du MRNF, analysées **à l'échelle du secteur d'intervention** (n = 657).

RATF	CARTE ÉCOFORESTIÈRE	CARTOGRAPHIE LIDAR
Pourcentage de surfaces terrières blessées (variable réponse PSTAB)	% de milieux humides	Nombre et longueur des lits d'écoulement potentiel
Saison de début et de fin du dossier	% de chaque classe de drainage	% des classes de pente lidar
Année de la coupe	% de type de couvert résineux, mixte et feuillu	% des valeurs de TWI (humide, sec, eau libre)
Type de coupe	% de chaque densité du couvert	
Nombre de secteurs d'intervention et de chantiers	% de contrainte de pente	
Unité d'aménagement	% de contrainte de sol	
Traitement effectué	% de contrainte de rugosité	
Superficie coupée	% de contrainte d'orniérage	
	% de contrainte d'érosion	
	% de contrainte de sentiers	
	% de chaque classe de hauteur	

Données provenant des industriels analysés **à l'échelle du secteur d'intervention** (n = 374).

Rapports d'exécution	
Traitement	Surface terrière après coupe
Année	Surface terrière prélevée
Procédé de récolte (bois, long ou court)	Surface terrière feuillue et résineuse avant et après coupe (284 secteurs d'intervention seulement)
Saison de début des opérations forestières	Surface terrière feuillue et résineuse prélevée (284 secteurs d'intervention seulement)
Chantier et NO_SEC_INT	Pourcentage de surface terrière résiduelle blessée
Surface terrière totale avant coupe	Travaux de jour ou nuit



Surface terrière totale après coupe

Données de suivi du déplacement de la machinerie (*tracking*), provenant des industriels, analysées à l'échelle du secteur d'intervention (n = 307).

Suivi de la machinerie (*tracking*)

Sinuosité

Longueur totale de sentiers

Superficie occupée par les sentiers

Données provenant des placettes géolocalisées du MRNF (n = 709)

Données à l'échelle de la placette-échantillon

PSTAB

Nombre de tiges résineuses

Nombre de tiges feuillues

Nombre de tiges de DHP de ≤ 13.1 cm

Nombre de tiges de DHP de 15.1 à 39 cm

Nombre de tiges de DHP de ≥ 39.1 cm

Nombre de tiges total

Distance d'un chemin principal

Distance d'un chantier de débardage

Données provenant des placettes du MRNF et des industriels (n = 1 853 et 15 218 tiges résiduelles)

Données à l'échelle de la tige

Blessure (0 ou 1)

Type de blessure

Essence

Résineux ou feuillu

Diamètre à hauteur de poitrine

Code de défaut MSCR

MSCR

Code d'état de l'arbre



Annexe D. Types de coupe et procédés de récolte

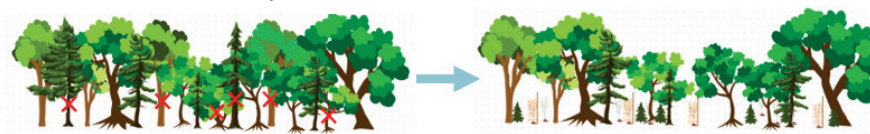
Types de coupe étudiés

Définitions (BFEC) :

- **CJ** : Coupe de jardinage – prélèvement faible et constant visant une structure d'âge et de diamètre équilibrée dans le temps



- **CPI_CP** : Coupe progressive irrégulière à couvert permanent – série de coupes d'ensemencement à prélèvement variable avec maintien d'un couvert



- **CPI_RL** : Coupe progressive irrégulière à régénération lente – coupe d'ensemencement avec prélèvement plus fort suivi d'une coupe finale



Procédés de récolte étudiés

Bois long :

1. **Abatteuse groupeuse** : coupe des arbres
2. **Débusqueuse** : transport d'arbres ou de troncs entiers
3. **Ébrancheuse** : ébranchage en bordure de chemin



Bois court :

1. **Abatteuse multifonctionnelle** : coupe, ébranchage, tronçonnage en forêt
2. **Porteur** : débardage des billes tronçonnées





cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE

CERFO.QC.CA

2440, chemin Sainte-Foy
Québec (Québec) G1V 1T2

Téléphone : (418) 659-4225
Télécopieur : (418) 659-4226
Courriel : info@cerfo.qc.ca