

Chantier sur les forêts feuillues et mixtes Forêts tempérées nordiques

Février 2023

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DES FORÊTS



Coordination

Michel Letarte, ing.f., Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers (DAEF)

François Guillemette, ing.f., M. Sc., Direction de la recherche forestière (DRF)

Contribution :

Steve Bédard, ing.f. M. Sc., DRF; Étienne Boileau, ing.f., DAEF; Simon Bilodeau-Gauthier, ing.f., Ph. D., DRF; François Boucher, ing.f., 14-15 - UG/Laurentides; François Guillemette, ing.f., M. Sc., DRF; Sébastien Crosnier-Pichette, ing.f., BMMB; Marie-Lou Gravel, ing.f., M.B.A., DAEF; Filip Havreljuk, ing.f., Ph. D., DRF; Maryse Le Lan, biol., ing.f. M. Sc., 04-DGfO; Sébastien Meunier, ing.f., M. Sc., 07-DGfO; David Morin, ing.f., M. Sc., DCC; Isabelle Paquin, ing.f., 07-DGfO; Hugues Power, ing.f., Ph. D., DRF; Patricia Raymond, ing.f., Ph. D., DRF; Marc-Antoine Renaud, ing.f., DGSMS – DG; Mélanie Ruel, ing.f., 01-DGfO; Charles Vigeant-Langlois, ing.f. M. Sc., 03-DGfO.

Révision technique :

Jacques Gravel, ing.f., Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers

Collaboration

Lyne Giasson, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers

Référence : MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DES FORÊTS (2023). *Chantier sur les forêts feuillues et mixtes – Forêts tempérées nordiques*, Québec, Gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 111 p.

© Gouvernement du Québec

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023

ISBN (PDF) : 978-2-550-91974-2

Note : Le masculin est utilisé sans aucune discrimination et dans le seul but d'alléger le texte.

Table des matières

Introduction.....	1
Les équipes de travail du CFFM	3
Sommaire exécutif	5
1. Suivi d'implantation des recommandations du CIMOTFF (2014).....	13
2. Modélisation du rendement des forêts envahies par le hêtre à grandes feuilles dans le contexte de la maladie corticale du hêtre	19
3. Évaluation et mise à jour des matrices de répartition par produits.....	32
4. Détermination des diamètres à maturité financière des principales essences forestières de la zone tempérée nordique	41
5. Rendement et production dans les érablières nordiques -Sapinière à bouleau jaune de l'ouest (régions écologiques 4b et 4c)	57
6. Objectifs de base de la sélection des arbres lors de la récolte des peuplements feuillus ou mixtes à dominance de feuillus	65
7. Balises d'application des traitements de coupes partielles dans les peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux	73
8. Poursuite des travaux et suivi d'implantation du CFFM.....	92
Poursuite des travaux amorcés au CFFM	92
Suivi d'implantation des recommandations du CFFM.....	92
Annexe 1 : Critères de sélection, du nombre et de l'espacement des semenciers à conserver.....	95
Annexe 2 : Sigles, essences forestières, traitements sylvicoles et variantes, végétations potentielles et régions écologiques	99
Bibliographie.....	106

Liste des tableaux

Tableau 1 Tableau synthèse du bilan 2020 de la mise en œuvre des recommandations du CIMOTFF-1 de 2014.....	16
Tableau 2 Classification des peuplements en types de forêts (TYF)	24
Tableau 3 Évolution des types de forêts (TYF) 20 ans après la coupe de jardinage	25
Tableau 4 Biais relatif de chaque méthode d'estimation des volumes nets des billes de grande valeur (DF1F2) des quatre essences étudiées pour les groupes de peuplements jardinés du projet de mesure des effets réels des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999	34

Tableau 5 Groupement des régions écologiques utilisées dans les modèles et matrices de RPP. Les caractères en italique représentent les régions écologiques pour lesquelles il n'y avait aucune observation dans la base de données de tronçonnage.	36
Tableau 6 Proportion moyenne de sciage, de pâte et d'autres produits dans le volume marchand brut (VMB) de l'érable à sucre sur pied dans 20 unités de compilation de l'UA 064-71 selon la matrice provinciale actuelle et la nouvelle matrice régionalisée en utilisant le modèle de classe de qualité (ABCD). La proportion moyenne inclut tous les arbres dont le DHP est supérieur à 23 cm.....	37
Tableau 7 Proportion moyenne de sciage, de pâte et d'autres produits dans le volume marchand brut (VMB) du bouleau jaune sur pied dans 20 unités de compilation de l'UA 064-71 selon la matrice provinciale actuelle et la nouvelle matrice régionalisée en utilisant le modèle de classe de qualité (ABCD). La proportion moyenne inclut tous les arbres dont le DHP est supérieur à 23 cm.....	38
Tableau 8 Nombre d'arbres à l'étude par essence et par regroupement de régions écologiques.....	42
Tableau 9 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour 11 essences ou groupes d'essences calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière actuelle pour le scieur de feuillus (revenu brut ou net [= brut moins le <i>coût de récolte de 69 \$/m³</i>]) <i>des arbres à 30 ans, le diamètre minimal pour obtenir une VF_{tot} de 60 \$/m³ et des notes</i>	48
Tableau 10 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et de l'érable rouge dans les régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité.....	49
Tableau 11 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre du bouleau jaune dans les régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité	50
Tableau 12 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et de l'érable rouge dans les régions écologiques 4a, 4b, 4c, et 4d, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité.....	51
Tableau 13 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre du bouleau jaune dans les régions écologiques 4a, 4b, 4c, 4d, 5a, 5b et 5e, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité	52
Tableau 14 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et de l'érable rouge dans les régions écologiques 1a, 2b, 3d, 4f, 4g, 4h 5f, 5g, 5h et 5i, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité.....	53
Tableau 15 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre du bouleau jaune dans les régions écologiques 1a, 2b, 3d, 4f, 4g, 4h 5f, 5g, 5h et 5i, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité.....	54

Tableau 16 Proportion du volume marchand net dans les érables à sucre selon les grades de billes de bois d'œuvre de grande valeur (F1F2) ou de grade minimal pour le sciage conventionnel (F3), par classe de qualité de l'arbre sur pied, par classe de DHP et par région écologique selon les nouveaux modèles de répartition par produits.....	58
Tableau 17 États initiaux et rendements observés des érablières nordiques (régions écologiques 4b et 4c) et des autres érablières situées au nord du fleuve Saint-Laurent (régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c).	60
Tableau 18 Application des indicateurs selon le procédé de régénération.	66
Tableau 19 Synthèse des indicateurs et des cibles proposées par défaut pour des traitements sylvicoles en phase d'ensemencement. Note : Le choix des indicateurs et des cibles se fait régionalement selon les orientations et objectifs du PAFIT; ces valeurs sont présentées à titre indicatif.	72
Tableau 20 Composition en ST marchande (ST) et en volume marchand brut (VMB) des placettes avant et après le traitement en fonction de la ST marchande résiduelle	75
Tableau 21 Surface terrière marchande (ST), volume marchand brut et accroissement annuel moyen (AAM) de ces deux variables à la fin du cycle de coupe en fonction de la ST marchande résiduelle et de la durée du cycle de coupe partielle, d'après les simulations des modèles BjR et Artémis 2014	78
Tableau 22 Nombre de gaules nécessaires à la production d'une unité de ST marchande ($1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) en fonction de l'essence, du DHP de la gaule et du temps après la coupe partielle dans les BjR	82
Tableau 23 Caractéristiques moyennes des peuplements en fonction de la végétation potentielle après 15 ans d'observation (26 à 58 ans après coupe).....	89
Tableau 24 Suivi d'implantation des recommandations du CFFM	93
Tableau 25 Âges de production de semences, diamètres à maturité physiologique, diamètres proposés pour les semenciers et les legs biologiques, ainsi que le nombre de semenciers suggérés à l'hectare par essence	98

Liste des figures

Figure 1 Localisation des dispositifs expérimentaux utilisés pour documenter l'effet de la maladie corticale sur les risques de mortalité des hêtres à grandes feuilles	20
Figure 2 Prédiction du taux de mortalité à l'échelle du peuplement et à l'échelle de l'arbre pour le hêtre à grandes feuilles avec présence (ligne rouge) et sans présence confirmée de la maladie corticale du hêtre (ligne noire).....	21
Figure 3 Biais de la surface terrière marchande par essence des modèles de croissance 20 ans après la coupe. ERR = érable rouge (<i>Acer rubrum</i>), AUF = autres feuillus, RES = essences résineuses.	23
Figure 4 Densité des gaules de HEG (a) et d'ERS (b) 20 ans après la coupe en fonction du nombre de gaules de HEG avant la coupe et des trois niveaux de proportion de la surface terrière marchande de HEG avant la coupe.....	27
Figure 5 Comparaison des prévisions du nombre de recrues par période de cinq ans des modules de recrutement avec et sans gaules	29
Figure 6 Comparaison des prévisions du nombre de recrues par période de cinq ans des modules de recrutement avec et sans gaules pour les principales essences. Régression linéaire des observations en fonction des prédictions (ligne bleue) et relation d'égalité entre les prévisions et les observations (ligne noire).....	29
Figure 7 Taux annuel de changement de valeur du bois d'œuvre (EFVbo) sur 11 ans (moyenne et intervalles de confiance à 95 %) de l'ERS de groupe de classes CR et de groupe de qualité AB dans le regroupement de régions écologiques 2a 3abc selon le DHP initial de l'arbre. Les nombres inscrits au-dessus des courbes représentent le nombre d'observations dans une classe de DHP sur deux.....	45
Figure 8 Valeur financière totale de l'arbre (VFtot) pour l'industrie (\$/m ³ net) de l'ERS selon la classe de qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou D), par région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c ou 4d, 4f et 4g)	45
Figure 9 Valeur financière totale de l'arbre (VFtot) pour l'industrie (\$/m ³ net) du BOJ selon la classe de priorité de récolte de l'arbre sur pied (M, S ou CR), par région écologique (3a et 3b, 3c et 3d, 4b, 4c ou 4d, 4f et 4g).....	46
Figure 10 Valeur financière totale de l'arbre (VFtot) pour l'industrie (\$/m ³ net) de l'ERS selon la classe de priorité de récolte de l'arbre sur pied (M, S ou CR), par région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c ou 4d, 4f et 4g)	47
Figure 11 Localisation des sites de l'étude de Voyer et autres (en prép.), par domaine bioclimatique (couleurs) et région écologique (codes en noir et délimitations par des lignes grises).....	61
Figure 12 Localisation des dispositifs expérimentaux utilisés dans l'analyse du cycle de coupe (rotation) dans le modèle BjR.....	74

Figure 13 Accroissement annuel périodique en ST marchande et en volume marchand brut après coupe partielle en fonction des groupes de ST marchande résiduelle : « 14 m ² ha ⁻¹ » (12 à 16 m ² ha ⁻¹) et « 18 m ² ha ⁻¹ » (16 à 20 m ² ha ⁻¹) pour les prévisions combinées des deux modèles (BjR et Artémis 2014)	77
Figure 14 Variation autour de la moyenne des prévisions de la ST issue des gaules du peuplement résiduel en fonction du temps depuis la coupe partielle	80
Figure 15 Nombre de gaules nécessaires après la coupe pour produire une unité de ST marchande (1 m ² /ha) en fonction de l'essence, du DHP et du temps écoulé depuis la coupe partielle dans les BjR	81
Figure 16 Relations entre le nombre de microplacettes requises et la densité de gaules dans la population ciblée dans les peuplements feuillus ou mixtes à dominance feuillue, selon trois niveaux de marge d'erreur (E) relative acceptée avec des grappes de 10 microplacettes de 4 m ² (a) ou de 25 m ² (b)	84
Figure 17 Relations théoriques entre le nombre de microplacettes requises et le coefficient de distribution des gaules, selon trois niveaux de marge d'erreur (E) acceptée	86
Figure 18 Nombre et proportion des peuplements étudiés qui respectent les critères de fonctionnalité après 15 ans d'observation (n total = 135), soit 26 à 58 ans après la coupe à diamètre limite	88

Introduction

L'aménagement et la sylviculture des forêts tempérées nordiques sont relativement complexes. L'évolution du contexte de pratique et les mises en œuvre de nouvelles connaissances soulèvent régulièrement des interrogations de la part des praticiens.

Le Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue (CIMOTFF, Saucier et autres, 2014) a été mis sur pied en 2013-2014 afin de répondre à certaines interrogations relatives à l'utilisation de ce qui était alors nommé des « traitements alternatifs ». Il était nécessaire de s'assurer que les modalités des traitements permettraient de respecter le maintien de la durabilité des forêts, de la possibilité forestière annuelle et des attributs jugés importants pour l'atteinte des objectifs d'aménagement écosystémique. Les conclusions du rapport du CIMOTFF ont permis d'encadrer certaines modalités des traitements sylvicoles, entre autres en établissant des diamètres à maturité financière (DMF) pour l'érable à sucre et le bouleau jaune et en indiquant des balises d'utilisation des DMF.

Malgré la publication du rapport du CIMOTFF, au cours des années suivantes, les sylviculteurs régionaux du Secteur des opérations régionales (SOR), responsables de l'établissement des prescriptions sylvicoles dans la zone feuillue tempérée nordique, ont mentionné la nécessité d'acquérir de nouvelles connaissances qui leur permettraient de faire des choix plus éclairés. À l'automne 2019, devant les besoins exprimés par les sylviculteurs du MFFP, un nouveau comité a été formé avec des représentants du SOR, de la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers (DAEF) et des chercheurs de la Direction de la recherche forestière (DRF).

Plus d'une douzaine de sujets ont été soulevés au comité Chantier sur les forêts feuillues et mixtes (CFFM) relativement à l'acquisition de nouvelles connaissances. Ce chantier a fonctionné en équipes de travail pour chacune des sept thématiques retenues. Chaque équipe était composée d'un ou de plusieurs chercheurs et de représentants du SOR. Cette structure a permis des échanges réguliers entre les chercheurs responsables du développement des nouvelles connaissances et les praticiens qui vivent au quotidien la mise en œuvre de ces connaissances.

Le présent rapport contient un sommaire des travaux réalisés qui se veut accessible aux ingénieurs forestiers, techniciens forestiers, gestionnaires ou autres professionnels du milieu forestier. Des publications plus détaillées sur certains sujets ont déjà été rédigées par les chercheurs ou étaient en cours de rédaction au moment de conclure ce rapport (voir les références). Des recommandations ont été formulées et certaines sont déjà en application dans les unités administratives concernées, et chacune des recommandations devrait influencer directement les prochains travaux du MFFP relatifs aux forêts feuillues et mixtes, et ce, à différents niveaux.

Les équipes de travail du CFFM

Les membres du comité ont participé à sept équipes de travail. Ceux-ci avaient la responsabilité de rédiger les différents chapitres et de soumettre une série de recommandations à l'intention des gestionnaires responsables, économistes forestiers, aménagistes forestiers et sylviculteurs.

1. Équipe sur le **suivi d'implantation des recommandations du CIMOTFF (2014)**

Coordonnateur : Étienne Boileau

Collaborateur : François Guillemette

2. Équipe sur la **modélisation du rendement des forêts envahies par le hêtre à grandes feuilles dans le contexte de la maladie corticale du hêtre**

Coordonnateur : Hugues Power

Collaborateurs : Steve Bédard, Simon-Bilodeau-Gauthier, François Boucher, François Guillemette, Sébastien Meunier, Isabelle Paquin et Charles Vigeant-Langlois

3. Équipe sur l'**évaluation et la mise à jour des matrices de répartition par produits**

Coordonnateur : Filip Havreljuk

Collaborateurs : Sébastien Crosnier-Pichette, Marie-Lou Gravel, François Guillemette, David Morin

4. Équipe sur la **détermination des diamètres à maturité financière des principales essences forestières de la zone tempérée nordique**

Coordonnateur : François Guillemette

Collaborateurs : François Boucher, Filip Havreljuk et Sébastien Meunier

5. Équipe sur le **rendement et la production dans les érablières nordiques - Sapinière à bouleau jaune de l'ouest**

Coordonnateur : François Guillemette

Collaborateurs : Steve Bédard, François Boucher, Filip Havreljuk et Sébastien Meunier

6. Équipe sur les **objectifs de base de la sélection des arbres lors de la récolte des peuplements feuillus ou mixtes à dominance de feuillus**

Coordonnateur : François Guillemette

Collaborateurs : Étienne Boileau, Maryse Le Lan, François Boucher, Sébastien Meunier, David Morin, Mélanie Ruel, Marc-Antoine Renaud

7. Équipe sur les **balises d'application des traitements de coupes partielles dans les peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux**

Coordonnatrice : Patricia Raymond

Collaborateurs : François Boucher, François Guillemette, Maryse Le Lan, Sébastien Meunier, Hugues Power, Mélanie Ruel et Charles Vigeant-Langlois

Sommaire exécutif

Le présent rapport contient un sommaire des travaux réalisés par le CFFM qui se veut accessible aux ingénieurs forestiers, techniciens forestiers, gestionnaires ou autres professionnels du milieu forestier. Des publications plus détaillées sur certains sujets ont déjà été rédigées par les chercheurs ou étaient en cours de rédaction au moment de conclure le rapport. Des recommandations ont été formulées et certaines sont déjà en application dans les unités administratives concernées, et chacune des recommandations devrait influencer directement les prochains travaux du MFFP relatifs aux forêts feuillues et mixtes, et ce, à différents niveaux.

Suivi d'implantation des recommandations du CIMOTFF (2014)

À l'automne 2013, le ministère des Ressources naturelles (MRN) a mis sur pied le Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue (CIMOTFF) afin d'évaluer si les traitements alternatifs déployés depuis la crise forestière de 2004 affectaient la durabilité de l'aménagement forestier. Il était entre autres question de prélèvement supplémentaire du capital forestier en croissance (CFC) des essences désirées, de non-récolte des essences moins désirées, ainsi que de pratique des coupes partielles avec un pourcentage de prélèvement plus élevé. Les travaux ont aussi porté sur la notion de maturité des tiges d'essences feuillues, qui s'est traduite par la notion de diamètre à maturité financière (DMF) et des caractéristiques de peuplements permettant une récolte soutenue de ces tiges. Une préoccupation demeurait : ne pas reproduire les effets de la coupe à diamètre limite qui, dans certains cas, a mené à une baisse de la qualité des forêts.

Le CIMOTFF a formulé 10 recommandations. Il a recommandé des outils et des indicateurs utiles au diagnostic et à la prescription sylvicoles, tels que l'abondance des perches d'essences feuillues désirées, le capital forestier en croissance (CFC) de ces mêmes essences à un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de 24 à 44 cm, le volume de bois d'œuvre de grande valeur et la surface terrière de hêtres et d'érables rouges non vigoureux. Ces indicateurs servent notamment à vérifier la capacité de remplacer de manière continue les DMF prélevés et de limiter l'augmentation de la production de tiges de faible qualité sans potentiel de bois d'œuvre.

Pour suivre l'évolution de l'application de ces recommandations, des bilans sommaires ont été effectués après quatre et cinq ans (2018 et 2019). Nous avons voulu dresser ici un premier bilan complet. À l'hiver 2020, un sondage a été soumis aux représentants des régions intervenant principalement dans la zone tempérée nordique et de la Direction de la recherche forestière (DRF) afin de décrire la façon dont les neuf premières recommandations du CIMOTFF sont appliquées dans leur cadre de travail et les raisons qui motivent leurs choix.

Dans l'ensemble, le bilan montre qu'à la suite des recommandations du CIMOTFF, les pratiques sylvicoles ont été modifiées de manière satisfaisante dans toutes les régions ayant un marché de bois d'œuvre feuillu. Ces changements varient d'une région à l'autre, en raison, par exemple, des différents enjeux liés à l'état de la forêt et à l'état des marchés des bois. Certaines recommandations sont en voie d'être implantées, comme celles touchant les mesures d'aménagement écosystémique, les analyses de rentabilité financière et économique, et des suivis forestiers relèvent davantage d'autres instances

(REEF, BMMB et DRF) et elles mériteraient d'y être officiellement transférées. Finalement, les lacunes de certaines recommandations mises en lumière lors de ce bilan seront ou ont été abordées dans le cadre du Chantier sur les forêts feuillues et mixtes. On note, par exemple, la bonification de la matrice de répartition par produit, le calcul de nouveaux DMF et le rendement des érablières nordiques.

Il est important que les mises à jour des recommandations fassent l'objet d'activités de transfert auprès des personnes concernées et qu'un suivi de leur mise en œuvre soit fait dans les deux ans suivant ce transfert. Pour les prochaines phases d'implantation, le bilan du CIMOTFF nous démontre que la formulation et l'application des recommandations doivent être adaptées aux différentes réalités régionales.

Recommandations

1a- Transférer les nouvelles données et les nouvelles connaissances du CFFM auprès des utilisateurs en région.

1b- Effectuer un suivi de la mise en œuvre des recommandations du CFFM qui devrait idéalement avoir lieu dans les deux années suivant l'étape de transfert.

Modélisation du rendement des forêts envahies par le hêtre à grandes feuilles dans le contexte de la maladie corticale du hêtre

Le phénomène d'envahissement des érablières du sud du Québec par le hêtre à grandes feuilles est bien documenté. Par contre, les aménagistes forestiers ont peu d'outils pour prévoir l'occurrence et l'intensité du phénomène sur leurs territoires, les impacts sur l'atteinte des objectifs d'aménagement forestier et l'efficacité des stratégies sylvicoles adoptées pour y faire face.

Dans ce contexte, nous avons travaillé à évaluer l'efficacité des outils actuels ainsi qu'à les adapter afin de mieux représenter la dynamique du hêtre dans les érablières. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les données de dispositifs expérimentaux de la DRF et sur celles du suivi des effets réels de la coupe de jardinage. Dans un premier temps, nous avons évalué la capacité des modèles de croissance Artémis 2014 et SaMARE à prévoir l'évolution de la surface terrière, de la composition du peuplement à long terme et du recrutement de nouvelles tiges commerciales.

Les résultats ont montré que les modèles performaient généralement bien, mais avaient tendance à sous-estimer le recrutement de tiges de dimension commerciale de hêtres à grandes feuilles et à surestimer celui d'érables à sucre. L'utilisation de paramètres ajustés pour le recrutement permet de corriger ce biais dans le modèle Artémis 2014, mais au détriment d'un plus grand biais lié à l'estimation de la surface terrière totale. Ces travaux nous ont mené à recommander l'utilisation de la version la plus récente du modèle Artémis 2014 pour simuler l'évolution de la surface terrière et l'utilisation des paramètres de recrutement ajustés pour évaluer l'évolution de la composition à long terme. Parmi les modifications effectuées, nous avons mis à jour le module de prévision de la mortalité du hêtre associée à la maladie corticale du hêtre (MCH). Ce module permet de mieux représenter la probabilité de mortalité des hêtres en présence de la MCH, un phénomène qui a pris de l'expansion au cours des dernières décennies. De plus, un nouveau module de recrutement qui se base sur le dénombrement des gaules

pour prévoir le recrutement de tiges de dimension commerciale a été développé pour le modèle SaMARE. Ce nouveau module permet de prévoir plus tôt l'augmentation du hêtre à grandes feuilles dans le couvert des arbres marchands puisque ce phénomène prend d'abord naissance dans le gaulis. En nous basant sur le suivi des effets réels 20 ans après la coupe de jardinage, nous avons évalué la composition des peuplements résiduels et les avons classés en types de forêt selon la classification utilisée pour le calcul des possibilités forestières.

Ce travail nous a permis de constater l'augmentation de la représentation des types de forêt associés à la présence de hêtres après la coupe forestière. En dernier lieu, toujours en nous basant sur les données de suivi des effets réels de la coupe de jardinage, nous avons évalué la possibilité de détecter à l'aide d'inventaires après traitement les peuplements qui présenteront des difficultés de régénération en érable à sucre. Ces travaux nous ont permis de confirmer que les peuplements dépassant le seuil de 800 gaules de hêtre à l'hectare après coupe étaient plus susceptibles de présenter des déficits de régénération en érable à sucre. L'ensemble de ces travaux a permis d'améliorer les outils disponibles pour prévoir la dynamique actuelle du hêtre dans les érablières du sud du Québec, mais des besoins persistent notamment pour prévoir l'effet des changements globaux (climat et ravageurs) sur le phénomène et pour prévoir la réponse du hêtre aux traitements sylvicoles visant son contrôle.

Recommandations

2a- Utiliser le modèle de mortalité en présence de MCH intégré au modèle de croissance Artémis 2014 pour réaliser les courbes de rendement, lorsque la MCH est présente sur le territoire.

2b- Utiliser la version 4.1.0 ou celle la plus récente du modèle Artémis 2014 pour évaluer l'évolution de la surface terrière marchande. Cependant, le modèle de croissance SaMARE devrait être priorisé lorsque la qualité des arbres et son effet sur leur répartition par produit sont des variables d'intérêt.

2c- Utiliser un seuil de 15 % de surface terrière marchande résiduelle et de 800 gaules ha⁻¹ de HEG après coupe afin d'identifier les érablières à haut risque d'échec de régénération en ERS.

2d- Utiliser le module de recrutement basé sur les gaules pour les simulations avec SaMARE lorsque l'on s'intéresse à la composition du recrutement dès qu'il sera disponible et que des données adéquates sur le dénombrement des gaules seront également disponibles.

Évaluation et mise à jour des matrices de répartition par produits

La valeur d'un arbre varie en fonction de la qualité et de la quantité des différents produits qui composent son volume marchand brut. Les modèles et les matrices de répartition par produits (RPP) permettent d'estimer, à partir du diamètre et des principales caractéristiques observables des arbres, les volumes de bois sur pied selon différentes classes de produits. Actuellement, les mêmes modèles et matrices de RPP sont utilisés dans l'ensemble de la province du Québec pour estimer le volume et la qualité des produits pour les arbres feuillus de 24 cm et plus. Nous avons évalué les biais, c'est-à-dire l'écart constant entre le volume observé et le volume prédit, de ces modèles et matrices de RPP qui sont en vigueur depuis 2015, avant de les mettre à jour par l'ajout de nouvelles données et variables. La comparaison des biais des modèles et matrices existants a été effectuée sur la base des volumes nets

prédits des billes de grande valeur (grades F1 et F2) pour huit méthodes d'estimation de la répartition par produits du volume marchand brut d'un arbre-échantillon.

L'estimation la plus précise du volume de bois d'œuvre des feuillus de grande valeur a été obtenue en utilisant un modèle ou une matrice qui inclut la classe de qualité des arbres sur pied (ABCD), alors que les estimations les plus biaisées ont été obtenues avec la classification MSCR, même si ces écarts sont demeurés relativement faibles dans les régions écologiques 2a, 3a et 3b. Par ailleurs, pour les autres matrices et régions, le biais peut être corrigé en utilisant des facteurs de correction.

Nous avons également mis à jour des modèles et matrices de RPP pour l'érable à sucre et le bouleau jaune et utilisant de nouvelles données d'échantillonnage acquises depuis 2018 et qui ont été intégrées à la base de données de tronçonnage.

Les nouvelles données ont permis, entre autres, d'améliorer la répartition des sites dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune. Les modèles ont été étalonnés individuellement pour chaque essence en fonction du DHP, seul ou en combinaison avec la classe de qualité, de chaque arbre-échantillon présent dans la base de données de tronçonnage, en incluant tous les nouveaux arbres-échantillons ajoutés récemment. Les meilleurs résultats, autant pour l'ERS que pour le BOJ, ont été obtenus en ajoutant la région écologique comme variable explicative dans les modèles. Dans certains cas, des régions écologiques voisines ont été regroupées à cause d'un nombre limité d'observations. Pour l'érable à sucre, la baisse la plus importante de la proportion de sciage a été observée dans les régions écologiques du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune, où cette proportion représente autour de 18 % du VMB de l'arbre, soit environ 50 % de moins que pour la matrice de RPP provinciale et non régionalisée actuelle. Cette diminution du sciage a entraîné une hausse considérable du volume de pâte et des autres produits. Pour le bouleau jaune, la plus forte diminution de la proportion de sciage a été observée dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'est (-38 %), suivi de la région écologique 4b (-26 %) et du sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'ouest (-19 %).

Les travaux futurs devraient consister, d'une part, à évaluer le biais des nouveaux modèles et matrices de RPP régionalisés, entre autres par la mise en place d'un projet qui permettrait un suivi de validation précis à l'échelle des chantiers de récolte, et, d'autre part, à poursuivre l'acquisition des données dans les régions écologiques où aucun échantillonnage n'a été effectué ou pour lesquelles la RPP est imprécise ou biaisée.

Recommandations

3a- Privilégier l'utilisation d'un modèle ou d'une matrice de RPP qui tient compte de la classe de qualité ABCD de l'arbre.

3b- Planter et utiliser les nouveaux modèles dans l'ensemble des outils du MFFP (MÉRIS, Capsis, DICA), principalement pour l'ERS dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune.

Détermination des diamètres à maturité financière des principales essences forestières de la zone tempérée nordique

Pour donner suite à l'une des recommandations du CIMOTFF de 2014, et en réponse à des besoins soulevés par le Secteur des opérations régionales, nous avons déterminé les diamètres à maturité financière (DMF) de 13 essences forestières de la zone tempérée nordique du Québec et mis à jour ceux de l'érable à sucre et du bouleau jaune. Rappelons que le DMF est le DHP d'un arbre d'une essence forestière (groupe d'arbres), sur une période de temps et dans un environnement spécifiques, lorsque l'accroissement de ce diamètre ne génère plus suffisamment de gains en valeur financière pour compenser les risques de pertes d'une partie de l'arbre par dégradation du tronc ou de pertes de l'arbre par mortalité. Nous avons aussi analysé la valeur financière de ces essences selon leur DHP.

Les résultats ont d'abord démontré que de nombreux arbres dans les forêts du domaine de l'État situées en zone tempérée nordique ont une valeur financière (\$/m³) inférieure au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle de la plus récente enquête, même lorsqu'il y a un marché favorable pour la pâte de feuillus durs. Ces arbres sont concentrés parmi certaines essences compagnes, comme le tilleul et la pruche, mais se trouvent aussi parmi les arbres d'un diamètre inférieur à 30 ou 34 cm et parfois même jusqu'à 40 ou 42 cm pour des essences de meilleure valeur (comme l'érable à sucre ou les bouleaux). Dans ces cas, pour favoriser la rentabilité financière de l'approvisionnement des usines de transformation, il est possible d'augmenter le diamètre minimal de récolte de ces arbres. Notons que les essences ayant les plus grandes valeurs financières par unité de volume sont le pin blanc, le chêne rouge et les épinettes. Cependant, ces essences sont aussi à risque d'être affectées négativement par des ravageurs exotiques au cours des prochaines décennies. Nous n'avons pas évalué en détails le bilan des risques et occasions que présentent ces essences dans le cadre des changements globaux en cours.

Les résultats ont aussi confirmé la plupart des DMF calculés précédemment pour l'érable à sucre et le bouleau jaune. Les principales nouveautés concernent la distinction des DMF selon la qualité des arbres (AB ou C) ainsi qu'une meilleure régionalisation, notamment dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune. Quant aux 13 autres essences, les résultats apportent un éclairage nouveau sur les DHP qu'il est financièrement intéressant d'atteindre avant la récolte pour optimiser la production de ces essences.

Recommandation

4a- Former un comité chargé de proposer des orientations pour intégrer les connaissances sur la valeur unitaire nette (\$/m³) des arbres et sur les diamètres à maturité financière dans le contexte d'aménagement et de planification régionale (tactique et opérationnelle), tout en tenant compte des autres connaissances disponibles, des objectifs et du contexte d'aménagement.

Rendement et production dans les érablières nordiques - Sapinière à bouleau jaune de l'ouest (régions écologiques 4b et 4c)

Des préoccupations ont été soulevées ces dernières années par les praticiens du secteur sud-ouest concernant le potentiel réel de production des érablières nordiques, soit celles situées dans les régions écologiques 4b et 4c du domaine de la sapinière à bouleau jaune. Avec les nouvelles données disponibles, nous avons recalculé le DMF de l'érable à sucre dans ce territoire. Dans les travaux du CIMOTFF en 2014, il avait été évalué à 48 cm pour les érables à sucre vigoureux ayant un potentiel de bois d'œuvre. Nous l'avons révisé à 44 cm pour les arbres de qualité C et à 34 cm pour ceux de qualité A

ou B. Nous avons aussi démontré que la valeur financière en bois d'œuvre de ces érables à sucre pour l'industrie (\$/m³) est généralement inférieure au coût moyen d'approvisionnement de la plus récente enquête. Ces résultats découlent principalement de trois facteurs. Premièrement, le volume de bois d'œuvre d'un érable à sucre dans ce territoire est d'environ 35 à 65 % inférieur à celui observé pour un même érable situé plus au sud, selon la qualité de l'arbre, le grade de la bille de sciage et les régions écologiques comparées. Deuxièmement, le rendement annuel (accroissement) en bois d'œuvre des meilleurs grades est diminué de 38 à 45 % dans ces érablières, comparativement à celles situées plus au sud. Cette situation est notamment attribuable à la plus faible abondance d'érables des meilleures qualités dans ce territoire nordique. Troisièmement, les conditions de croissance y sont généralement moins favorables, ce qui expliquerait la tendance à y observer davantage de carie et de coloration du cœur que dans les érablières situées plus au sud. Cependant, cette tendance est moins claire, car elle ne se reflète pas dans tous les jeux de données analysées. Il est possible que certains secteurs situés plus au sud aient de moins bonnes conditions de croissance, ce qui expliquerait la grande variabilité des observations.

Recommandations

5a- Prendre en considération la faible valeur de l'érable à sucre dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c dans le choix des scénarios et des investissements sylvicoles planifiés.

5b- Intégrer la matrice régionalisée de répartition par produits de l'érable à sucre pour les régions écologiques 4b et 4c dans les différents outils (MERIS, DICA, etc.) et processus utilisés dans l'organisation (MFFP).

Afin de produire et de récolter des érables à sucre de meilleure qualité, intégrer les recommandations suivantes dans les orientations d'aménagement et de sylviculture des régions écologiques 4b et 4c :

5c-i- Ajuster le DMF de l'érable à sucre dans l'intervalle de 34 à 44 cm dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c, selon les indicateurs forestiers (voir Saucier et autres, 2021), tout en prenant aussi soin de conserver suffisamment de semenciers de cette essence.

5c-ii- Réaliser les scénarios sylvicoles au moment approprié dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c afin de favoriser la production d'arbres plus jeunes.

5c-iii- Évaluer le potentiel de croissance du site afin de considérer le niveau de production attendu dans la détermination du scénario sylvicole retenu.

Objectifs de base de la sélection des arbres lors de la récolte des peuplements feuillus ou mixtes à dominance de feuillus

Il nous a été demandé de proposer une méthode de travail pour mieux uniformiser et rendre plus compréhensibles les directives de prélèvement des peuplements feuillus et mixtes tempérés. Nous proposons d'abord d'inclure un tableau de bord régional d'indicateurs clés avec des cibles cohérentes avec les objectifs énoncés dans les plans d'aménagement forestier intégrés tactiques (PAFIT) où des exemples sont montrés. Nous avons aussi structuré les principaux objectifs poursuivis lors de la sélection des arbres à récolter ou à laisser sur pied. Afin de maximiser l'amélioration de la productivité des peuplements, les directives de récolte ou de martelage doivent chercher, le plus possible, à protéger les

arbres qui constituent le CFC, à régénérer la superficie en essences désirées et à récolter les arbres perdant de la valeur financière en bois d'œuvre. Nous avons aussi rassemblé les informations les plus importantes afin de sélectionner les semenciers dans deux procédés de régénération.

Recommandation

6a- Ajouter aux prochains PAFIT un tableau de bord régional d'indicateurs clés avec des cibles cohérentes avec les objectifs énoncés.

Balises d'application des traitements de coupes partielles dans les peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux

L'équipe de travail s'est d'abord penchée sur le temps requis pour reconstituer la surface terrière en fonction de différents scénarios. Cet exercice, basé sur les modèles BjR et Artémis 2014, permet d'appuyer les hypothèses de retour à une surface terrière de près de 25 m²/ha en 25 à 40 ans dans les BjR, pour des surfaces terrières résiduelles moyennes entre 18 et 14 m²/ha. Puisque la modélisation montre que l'accroissement en surface terrière et en volume est plus élevé durant les 10 à 15 premières années après intervention, des scénarios sylvicoles plus intensifs pourraient être envisagés lorsqu'il y a un intérêt pour synchroniser les coupes partielles des BjR avec celles des érablières (souvent réalisées sur des cycles plus courts). Il serait toutefois prudent d'examiner plus en détail ces scénarios à l'aide d'études de cas, ce que nous recommandons pour la suite des travaux. La durée des rotations, le pourcentage de prélèvement et la surface terrière résiduelle ont tous une influence sur la composition à long terme des peuplements, la qualité des bois et la régénération, et donc sur la qualité générale du peuplement à long terme.

Les travaux montrent qu'il peut être risqué d'orienter les décisions sylvicoles uniquement sur des critères de surface terrière ou de volume. L'étude sur les critères de fonctionnalité (CFC peuplement, CFC perches et C.D. gaules) dans des peuplements traités en coupe à diamètre limite entre 1970 et 1990 révèle qu'environ la moitié des peuplements avaient une régénération insuffisante de 28 à 56 ans après intervention. Les problèmes étaient exacerbés dans les végétations potentielles à dominance résineuse MS1 et RS1 (C.D. < 40 %). Un petit pourcentage des peuplements (6 %) nécessiterait tout de même une réhabilitation complète, puisqu'aucun critère n'était satisfait. Les résultats de cette étude de cas montrent bien l'importance de connaître l'état de la régénération, notamment les gaules, afin de prescrire le bon scénario sylvicole. L'état de la régénération doit être pris en compte au même titre que les caractéristiques du bois sur pied.

La modélisation du nombre de gaules en essences désirées montre que ce sont celles qui ont les plus fortes dimensions qui vont contribuer le plus à la surface terrière du futur peuplement. Il importe donc d'éviter de les abîmer lors des travaux de récolte. Cet outil de modélisation nouvellement développé nécessite des données d'inventaire de dénombrement par essence et classe de 2 cm. Comme les inventaires de ce type sont plus longs à réaliser et plus coûteux que les inventaires d'occurrence (présence/absence) servant au calcul du coefficient de distribution (C. D.), nous avons examiné comment les méthodes d'inventaire pouvaient influencer leur précision.

Il apparaît que la disposition spatiale (aléatoire, en croix, en ligne) des microplacettes de dénombrement des gaules sur le terrain influence peu la précision. La densité des gaules présentes sur le terrain influence davantage la précision, le nombre de placettes requises étant plus grand lorsque la densité des gaules est faible. En outre, cette étude montre que le nombre de placettes de dénombrement requises pour obtenir une précision acceptable est tout de même élevé en comparaison avec le nombre de placettes d'occurrence (présence/absence) nécessaires au calcul du C.D. de la régénération. Cette dernière méthode pourrait donc être privilégiée pour nous informer sur l'abondance de gaules présentes avant intervention pour des fins de diagnostic sylvicole.

Des travaux supplémentaires devront être réalisés afin de permettre l'intégration des connaissances développées à l'aménagement forestier. Parmi ces travaux, l'étude de la transition des tiges entre les stades de régénération, de gaules, de perches et d'arbres matures de grandes dimensions devra se poursuivre afin de bien comprendre les effets des traitements sylvicoles sur le développement des peuplements. Jumelés à des études de cas, ces résultats pourraient mener au développement de logigrammes de diagnostics sylvicoles et ainsi guider la prise de décision en sylviculture des peuplements mixtes tempérés.

Recommandation

7a- Réaliser des inventaires de coefficient de distribution des gaules avec des microplacettes (4 m² de préférence) pour connaître l'état du renouvellement du peuplement lors du diagnostic sylvicole.

1. Suivi d'implantation des recommandations du CIMOTFF (2014)

Mandat

Réaliser la recommandation 10 du CIMOTFF (Saucier et autres, 2014) : bilan de l'application des recommandations du CIMOTFF.

Faire un état de situation des recommandations du CIMOTFF et des éléments qui devraient y être ajoutés, compte tenu des nouvelles connaissances disponibles et de l'expérience opérationnelle acquise depuis 2014.

Introduction

La dixième recommandation du CIMOTFF de 2014 proposait qu'un bilan de ses recommandations soit effectué deux ans après le début de leur mise en œuvre. Des bilans sommaires ont été réalisés après quatre et cinq ans (2018 et 2019).

À l'hiver 2020, nous avons demandé aux représentants régionaux concernés et à la Direction de la recherche forestière (DRF) de décrire la façon dont les neuf premières recommandations du CIMOTFF de 2014 sont appliquées dans le cadre de leur travail et les raisons qui motivent leurs choix.

Un bilan a été élaboré à la suite d'une analyse des réponses du sondage. Ce rapport présente une synthèse des résultats (voir le Tableau 1).

Résultats

1. Réviser la matrice de répartition par produits MSCR-OP

Plusieurs régions évitent les problèmes, tels que les biais de volumes de certaines combinaisons, que peut entraîner cette matrice en n'y recourant pas. Les régions où elle est le plus utilisée sont celles où l'analyse effectuée en 2014-2015 a démontré que la matrice MSCR-OP fonctionnait bien. De plus, d'autres analyses effectuées par la DRF à l'hiver 2020 (voir le chapitre 3) corroborent ce constat pour les érablières.

Une équipe de travail du CFFM poursuit actuellement des travaux d'amélioration des matrices de répartition par produits (voir le chapitre 3).

2. Contrôler les essences feuillues sans preneur ou de moindre intérêt (hêtre et érable rouge principalement), particulièrement parmi les MO et SO de 24 à 32 cm de DHP

La structure industrielle des régions vient grandement influencer les limites de cette recommandation. La Direction de la gestion des forêts de Lanaudière et des Laurentides (14-15-DGfO) met en œuvre cette recommandation, alors que la Direction de la gestion des forêts de l'Outaouais (07-DGfO) force la récolte de ces essences sans tenir compte des priorités MO et SO parmi les DHP de 24 cm ou plus. Les autres

régions qui ont un meilleur marché pour la pâte parviennent plus facilement à mettre en marché toutes les qualités de toutes les essences feuillues, donc cette recommandation s'applique peu dans ces régions.

La DRF, en collaboration avec les DGFo 07 et 14-15, continue d'approfondir les connaissances sur l'envahissement du HEG, la MCH et le développement de stratégies sylvicoles adaptées. Une équipe de travail du CFFM a poursuivi des travaux sur les impacts de ces problématiques sur le rendement des forêts (voir le chapitre 2).

3. Utiliser la régression des arbres d'un DHP de 10 à 22 cm d'essences désirées afin d'évaluer la possibilité d'accepter une plus forte proportion de sentiers ou d'augmenter le taux de prélèvement

Cette recommandation n'est pas mise en œuvre, car la demande ne se présente pas ou son application ne permettrait pas une exploitation durable de la forêt. Par exemple, un plus fort prélèvement pourrait compromettre la prochaine rotation.

4. Intégrer au diagnostic sylvicole la notion de DMF ainsi que l'évaluation des arbres d'un DHP de 10 à 22 cm et du CFC d'un DHP de 24 à 44 cm

À l'exception de la Direction de la gestion des forêts de l'Abitibi-Témiscamingue, qui approvisionne principalement une usine de pâte, toutes les régions utilisent les DMF et intègrent la gestion des arbres d'un DHP de 10 à 22 cm et du CFC de ceux d'un DHP de 24 à 44 cm dans leur diagnostic.

5. Former un comité chargé d'analyser les DMF des essences peu longévives

Presque toutes les régions ont travaillé à établir des diamètres de récolte pour les essences peu longévives. Toutefois, elles indiquent qu'elles aimeraient approfondir ces analyses dans un comité, avec l'appui de la DRF.

Une équipe de travail du CFFM, mise sur pied à la fin 2019, a réalisé des travaux sur ce sujet (voir les chapitres 4 et 5).

6. Fixer des cibles d'aménagement écosystémique à l'échelle du paysage et du peuplement ainsi que tester leur rentabilité

Cette recommandation n'a pas été directement suivie. Le sujet de cette recommandation a été plutôt abordé en partie sur le plan tactique, par l'intermédiaire de la stratégie d'aménagement écosystémique. Parmi les mesures prises pour atteindre cet objectif, notons celles associées aux enjeux de structure d'âge de la forêt, de raréfaction des vieilles forêts et de legs biologiques.

7. Évaluer la rentabilité financière à l'échelle du chantier, ou à une échelle plus vaste, afin d'éviter la récolte des peuplements considérés comme moins rentables

L'appropriation plus généralisée des outils et des méthodes d'analyse financière et économique concernant les traitements sylvicoles s'est faite au cours des deux dernières années au MFFP. Plusieurs régions rencontrent peu ou pas de problèmes financiers lors de la réalisation des coupes partielles en forêt feuillue; la recommandation ne s'applique pas dans ces cas.

Cependant, les DGFo 07, 011 et 14-15 ont un problème de contournement des peuplements les moins rentables, notamment à cause d'un surplus de bois de trituration par rapport à la demande du marché.

Lorsque des analyses financières sont effectuées, elles le sont souvent à l'échelle de l'unité de compilation (UC), puisque c'est l'échelle de travail du modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles (MÉRIS). Avec l'analyse par chantier, une approche plus globale de la rentabilité financière permettrait une meilleure modulation de l'aide financière et éviterait de contourner systématiquement les peuplements les moins intéressants. Cette option pourrait être explorée par le Bureau de mise en marché des bois (BMMB) et le Réseau d'experts en économie forestière (REEF).

8. Intégrer les connaissances développées par le CIMOTFF de 2014 dans le processus diagnostique

Toutes les régions ont intégré en grande partie les connaissances développées par le CIMOTFF de 2014 dans leur processus diagnostique.

Lorsqu'une recommandation n'est pas retenue, c'est généralement en raison d'un contexte industriel régional particulier et de caractéristiques de peuplement inadéquates (Boileau et Guillemette, 2020) ou encore parce que les pratiques actuelles permettent d'atteindre les cibles (p. ex. respect du temps de rotation du Guide sylvicole [MRN 2013b]).

9. Valider l'atteinte des caractéristiques nécessaires pour assurer la pérennité des récoltes

Les suivis actuels répondent partiellement à cette recommandation. À l'exception du suivi de conformité, il n'y a pas eu d'autres suivis réalisés dans les coupes partielles de 2010 à 2019. Seules quelques régions réalisent des suivis de la régénération.

On note un manque de ressources financières et humaines pour réaliser ces suivis. Le comité chargé d'encadrer le suivi des recommandations du CIMOTFF n'a pas été mis sur pied.

L'élaboration du suivi forestier (efficacité) est en cours dans le cadre des actions découlant de l'audit de performance du Vérificateur général du Québec sur les travaux sylvicoles déposé au printemps 2017. La DRF a amorcé en 2019 et en 2020 deux nouveaux projets de suivi de validation (mesure des effets réels) des coupes partielles.

10. Effectuer un bilan des recommandations du CIMOTFF deux ans ou deux saisons après leur mise en œuvre

Un bilan partiel a été produit en novembre 2014 par la DAEF. Des bilans partiels de l'intégration du CIMOTFF aux pratiques ont été réalisés à l'échelle provinciale par la DPGF en 2017, par la DRF en 2018 et par la DAEF en 2019.

Tableau 1 Tableau synthèse du bilan 2020 de la mise en œuvre des recommandations du CIMOTFF-1 de 2014

		Régions							DRF
N°	Recommandation	1	03 et 12	4	5	7	8	14 et 15	
1	Réviser la matrice de répartition par produits MSCR-OP	Par le biais du CIMOTFF-2 , la DRF participe au comité matrice qui s'occupe de réviser et de régionaliser les modèles et matrices de répartition par produits. Travaux et améliorations réalisés dans les dernières années : calcul de biais des 8 matrices, comparaisons avec effets réels 20 ans, etc. Plusieurs projets d'échantillonnage dans divers types de forêts et plusieurs essences ont été réalisés pour augmenter la robustesse des matrices, en particulier la MSCR-ABCD							
	Quelle matrice est utilisée?	MSCR-OP	MSCR-OP surestimation de O	Matrice ABCD régionale (industrie)	MSCR-OP et MSCR-ABCD selon données disponibles	MSCR-ABCD	MSCR Marché bois de qualité absent	MSCR-OP et MSCR-ABCD selon données disponibles	S.O.
2	Contrôler les essences feuillues sans preneur ou moins désirées	NA Preneurs pour toutes essences				OUI Intégré dans le diagnostic (va au-delà de MO, SO 24-32 cm)	OUI Partiellement (M ≥ 20 cm)	OUI Inscrit dans les directives martelage (MO et SO 24-32 cm)	S.O.
3	Utiliser la régression entre les 10-22 et le CFC 24-44 pour accepter une augmentation des sentiers et du taux de prélèvement	NON : la plupart des régions n'appliquent pas cette recommandation. Dans bien des cas, le prélèvement ne peut pas être plus important si l'on veut éviter de compromettre la prochaine rotation.							S.O.
4	Utiliser la notion de DMF et l'évaluation des 10-22 et du CFC 24-44	DMF : Ers = 50 cm et Bj = 48cm CFC 10-44 : OUI N ^{bre} :10-22 : initial et résiduel	OUI via l'assistant prescription DMF : ajout DOR Ers et Boj CFC 24-44 : OUI N ^{bre} : 10-22 : initial et résiduel	DMF : OUI CFC 24-44: OUI OUI N ^{bre} :10-22 : OUI	DMF : OUI CFC 24-44 : OUI N ^{bre} : 10-22 : initial et résiduel (perte max. 25 % essence désirée)	DMF : OUI CFC 24-44 : Seuil CIMOTFF N ^{bre} : 10-22 : Seuil CIMOTFF + régénération	DMF : Avec CPI-CP sinon avec DOR CFC 24-44 : NON N ^{bre} : 10-22 : NON	DMF : OUI CFC 24-44 : OUI N ^{bre} : 10-22 : initial et résiduel (perte max. 25% essence désirée)	S.O.
5	Former un comité sur les diamètres à maturité des essences peu longévives	Aucun comité ne s'est occupé de cet élément. Presque toutes les régions ont travaillé à établir des DOR pour les essences peu longévives. Il resterait des travaux à faire pour préciser les DOR de certaines essences (SAB, EPX, PEU, BOP, CHR) dans certaines régions. Le comité CIMOTFF-2 a pris en charge ces travaux.							
	Est-ce que vous utilisez des DM pour ces essences?	OUI : Sab	OUI : Sab, Bop, Peu	OUI : toutes les essences	OUI : Toutes les essences, varie pour moduler le prélèvement	OUI : Sab, Bop, Peu	OUI : Epb seulement	OUI : Sab, Epx, Bop,Peu et autres FT	S.O.
6	Fixer des cibles d'aménagement écosystémique et évaluer leur rentabilité	Le sujet de cette recommandation est abordé en partie sur le plan tactique (PAFIT), par l'intermédiaire de la stratégie d'aménagement écosystémique.							S.O.
	Proportion structures A et B	NON : VOIC maintien de peuplements de structure complexe (âge) au PAFIT	NON	NON	NON	NON : VOIC maintien de peuplements de structure complexe (âge) au PAFIT			S.O.
	Rétention de gros et très gros arbres à l'échelle du peuplement	VOIC qui vise à conserver 1 m²/ha de gros bois « M » et « S »							S.O.
	Tester par modélisation la rentabilité des modalités	Aucune région n'a testé par modélisation la rentabilité des modalités et il n'y a pas eu de validation de l'atteinte de l'objectif du maintien de structures complexes.							S.O.
7	Évaluer la rentabilité financière à l'échelle du chantier ou à une échelle plus vaste	NON : Opérations déjà rentables, pas de secteur évité	NON : Début des analyses financières/chantier	NON : Opérations déjà rentables, pas de secteur évité		NON : BGA choisit les SI et bois sans preneur = pas obligation de récolte 100 %	NON : Opérations déjà rentables, pas de secteur évité	NON : Utilise MERIS donc par UC	S.O.
8	Intégrer les connaissances développées par le CIMOTFF dans le processus diagnostique et valider l'atteinte des attributs à l'aide des régressions	Toutes les régions ont intégré en grande partie les connaissances développées au CIMOTFF dans leur processus diagnostique (logigrammes). Les régressions sont peu utilisées pour valider les modalités. Lorsqu'une recommandation n'est pas retenue, c'est généralement en raison d'un contexte industriel régional particulier et de caractéristiques de peuplement inadéquates.							S.O.

		Régions						DRF
N°	Recommandation	1	03 et 12	4	5	7	8	
9	Valider l'atteinte des caractéristiques nécessaires pour assurer la pérennité des récoltes	Les suivis actuels répondent partiellement à cette recommandation. À l'exception du suivi de contrôle, il n'y a pas d'autres suivis qui sont effectués par les régions en raison, entre autres, du manque de ressource.						L'élaboration du suivi forestier (efficacité) est en cours. La DRF a amorcé de nouveaux projets de suivi de validation de coupes partielles.
		OUI : Suivi conformité, efficacité, PCR	NON : Relève des effets réels	NON : Suivi d'efficacité en développement		NON : Comité provincial devrait développer les suivis	NON : Seul un suivi oculaire du CD de la régénération	
10	Effectuer un bilan de des recommandations du CIMOTFF deux ans ou deux saisons après leur mise en œuvre	Bilan partiel DAEF-2014, DPGF-2017, DRF-2018 et bilan complet DAEF-2019						

Réalisé : 14 février 2022

Réalisé en grande partie
Réalisé en partie ou travaux en cours ou relève d'un autre comité
Non réalisé

Discussion et conclusion

Dans l'ensemble, le bilan montre qu'à la suite des recommandations du CIMOTFF de 2014, les pratiques sylvicoles ont été modifiées graduellement dans toutes les régions ayant un marché de bois d'œuvre feuillu (recommandation 8). Ces changements varient d'une région à l'autre, principalement en raison des différents enjeux liés à l'état de la forêt (qualité, essences) et à l'état des marchés des bois (recommandation 2).

Par contre, on peut constater que certaines recommandations sont partiellement appliquées parce qu'il s'agit de sujets plus vastes abordés principalement dans d'autres comités ou groupes de travail. C'est le cas des mesures d'aménagement écosystémique (recommandation 6) qui sont abordées au PAFIT, des analyses de rentabilité financière et économique (recommandation 7) qui sont traitées par le REEF et le BMMB et des suivis forestiers (suivi d'efficacité et effets réels) (recommandation 9) qui font l'objet de travaux à la DRF et à la Table provinciale sur les suivis (TSFo) du SOR.

Le CFFM devrait néanmoins informer et sensibiliser ces comités relativement aux recommandations qui les concernent afin qu'elles soient bonifiées. Par exemple, l'analyse financière à différentes échelles telles que le chantier de récolte amènerait une autre perspective de la rentabilité des opérations et de l'aide financière octroyée. Le développement ou l'amélioration d'outils par le REEF et le BMMB faciliterait probablement l'application d'analyse par chantier d'opération.

Il faut aussi préciser que les lacunes de certaines recommandations ont été abordées dans le cadre du CFFM (voir les autres sections de ce rapport). On note par exemple les travaux de la DRF pour améliorer la robustesse des matrices de répartition par produits (recommandation 1), les travaux pour améliorer les DMF et l'évaluation du rendement des érablières nordiques, les travaux sur les balises et le rendement des coupes partielles dans la sapinière à bouleau jaune ainsi que les travaux sur les DMF des essences peu longévives (recommandations 4 et 5).

Recommandations

Nous formulons les recommandons suivantes :

- a) Transférer les nouvelles données et les nouvelles connaissances du CFFM auprès des utilisateurs en région.
- b) Effectuer un suivi de la mise en œuvre des recommandations du CFFM. Il devrait idéalement avoir lieu dans les deux années suivant l'étape de transfert.

À moyen et long terme :

- c) Adapter aux différentes réalités régionales l'application des recommandations du CFFM.
- d) Continuer à résoudre les nombreux enjeux de l'aménagement de la forêt feuillue et mixte du Québec.

2. Modélisation du rendement des forêts envahies par le hêtre à grandes feuilles dans le contexte de la maladie corticale du hêtre

Mandat

L'objectif général du groupe de travail consistait à élaborer une méthode d'évaluation du rendement des forêts envahies par le hêtre à grandes feuilles (HEG) (*Fagus grandifolia*). De manière spécifique, cet objectif se divisait en deux parties :

1. Modéliser la mortalité due à la maladie corticale du hêtre (MCH).
2. Améliorer la prévision du recrutement du hêtre en contexte d'envahissement du sous-bois.

1. Mortalité du hêtre en présence de la maladie corticale du hêtre

Prémisse

La MCH a été recensée au Québec pour la première fois en 1965 près du lac Témiscouata et depuis elle progresse vers l'ouest de la province. La maladie est causée par deux champignons pathogènes, *Neonectria faginata* et *N. ditissima*. Elle survient lorsque les spores des champignons s'introduisent par des blessures faites à l'écorce, entre autres celles causées par la cochenille du hêtre, *Cryptococcus fagisuga* Lindinger, un insecte exotique provenant de l'Europe, ou la cochenille filamenteuse, *Xylococculus betulae* (Pergande), une espèce indigène de l'Amérique du Nord. Bien que la maladie soit le plus souvent associée à la présence de ces insectes, les stress climatiques, y compris les épisodes de sécheresse estivale, les températures élevées et le froid hivernal, peuvent rendre l'arbre sensible aux infections de *Neonectria*.

Dans le cadre de la préparation du calcul des possibilités forestières de la période 2023-2028 pour la région de l'Outaouais, le Bureau du Forestier en chef (BFEC) souhaitait avoir l'avis de la Direction de la recherche forestière (DRF) sur la possibilité de classer les peuplements forestiers en fonction de leur vulnérabilité à la MCH, et ce, dans le but d'intégrer les effets de la maladie au calcul.

Cependant, les connaissances actuelles ne permettent pas de classer de manière précise les peuplements selon leur vulnérabilité à la MCH. Il est par contre reconnu que les températures froides de l'hiver ainsi que les précipitations abondantes de l'automne limitent la présence de la cochenille et, par le fait même, la prolifération de la MCH. Les sites chauds et secs seraient donc plus propices à une activité intense de la MCH. L'abondance régionale des hêtres ainsi que leur diamètre moyen (les arbres de plus grand DHP étant plus susceptibles d'être attaqués sévèrement par la MCH) pourraient également être utilisés comme indicateurs à l'échelle régionale de la vulnérabilité des peuplements à la MCH.

Tout comme pour la vulnérabilité à l'échelle du peuplement, il n'y a pas de certitude quant aux taux de mortalité qui pourraient être anticipés en présence de la MCH. Certains auteurs font référence à une augmentation graduelle de la mortalité avec le temps depuis l'infestation alors que d'autres rapportent plutôt une augmentation rapide de la mortalité suivie d'une diminution puis d'une stabilisation du taux de mortalité.

Méthodologie

Une revue de la littérature scientifique portant sur les effets anticipés de la MCH sur la mortalité des hêtres a d'abord été effectuée. Puis, afin de documenter l'effet de la MCH sur la mortalité des HEG au Québec, les données de 28 dispositifs expérimentaux localisés dans huit régions écologiques (Figure 1) différentes ont été utilisées. Le taux de mortalité décennal des HEG a été modélisé en présence et en absence de MCH, et ce, à l'échelle du peuplement et à celle de l'arbre.

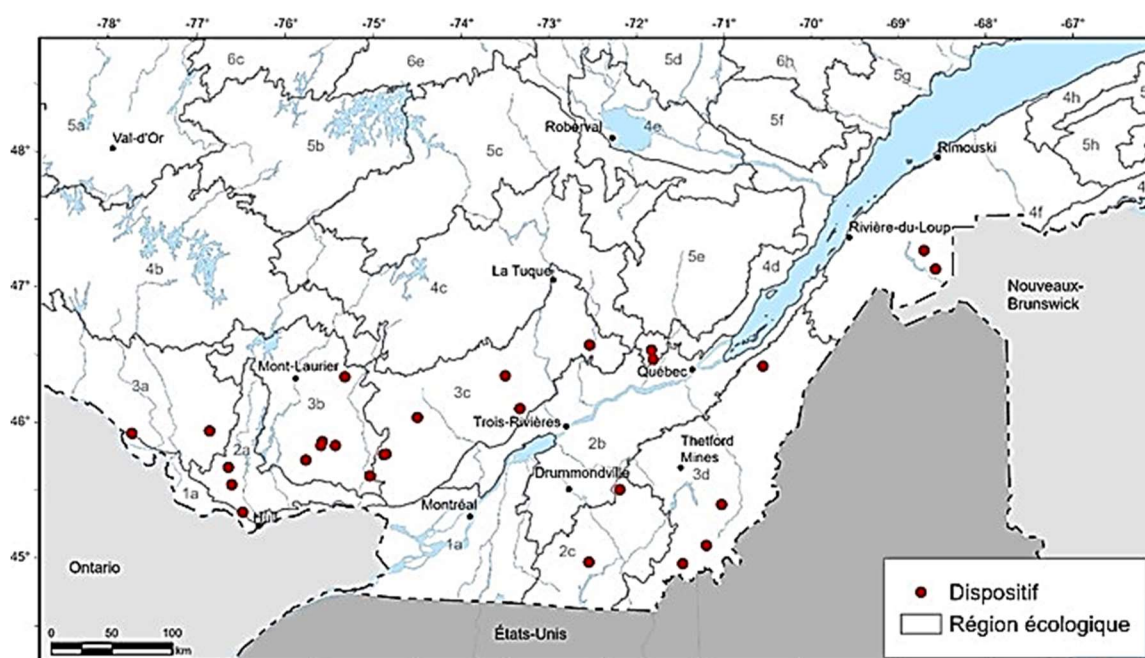


Figure 1 Localisation des dispositifs expérimentaux utilisés pour documenter l'effet de la maladie corticale sur les risques de mortalité des hêtres à grandes feuilles

Résultats

Le modèle de mortalité prévoit, en présence avérée de MCH dans le peuplement, des taux décennaux de mortalité à l'échelle du peuplement qui varient de 14,5 % à 19 % pour des diamètres quadratiques moyens de HEG de 15 cm et de 30 cm respectivement (figure 2). À titre de comparaison, pour les mêmes diamètres quadratiques, les taux de mortalité prévus sont plus faibles (4 à 12 %) pour les peuplements sans présence confirmée de MCH.

À l'échelle de l'arbre, les taux de mortalité décennaux en présence de MCH varient de 8,5 % à plus de 80 % pour des DHP de 10 à 60 cm respectivement alors qu'ils varient de 4 à 45 % sans présence avérée de MCH (figure 2). Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature sur la MCH où on observe généralement une augmentation du risque de mortalité avec la présence de la mortalité, particulièrement pour les arbres de grande dimension.

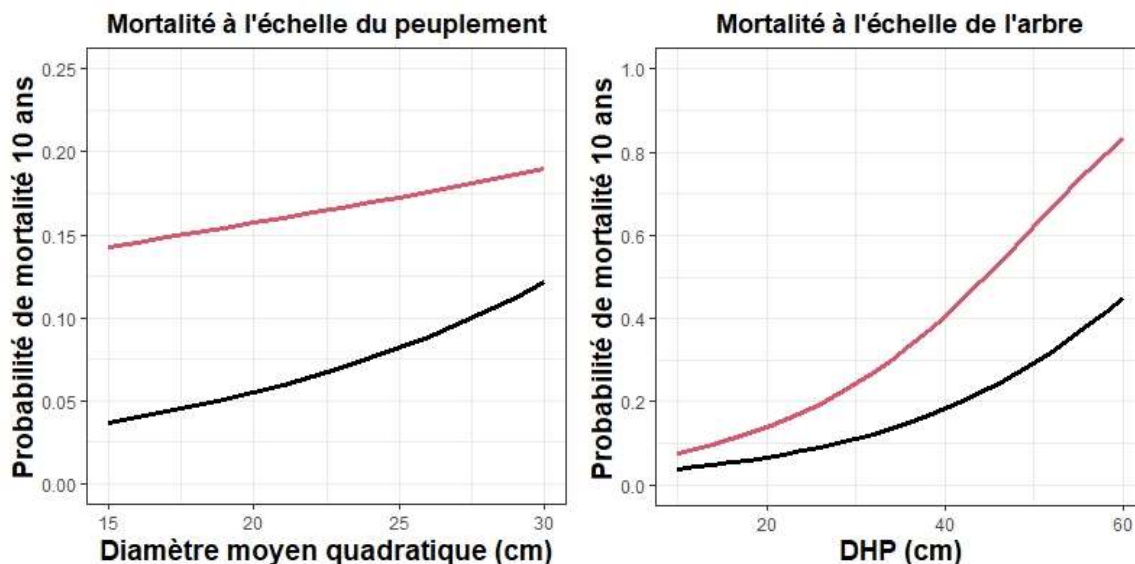


Figure 2 Prédiction du taux de mortalité à l'échelle du peuplement et à l'échelle de l'arbre pour le hêtre à grandes feuilles avec présence (ligne rouge) et sans présence confirmée de la maladie corticale du hêtre (ligne noire)

Discussion

La MCH a étendu sa répartition au cours des dernières décennies et est maintenant présente dans la majorité de l'aire de répartition du HEG au Québec. Les taux élevés de mortalité induits par la MCH pourraient impliquer une différence entre les prévisions des inventaires d'intervention et les volumes de HEG récoltés lorsqu'un délai entre l'inventaire et la récolte est présent. La méthode pour convertir les taux décennaux de mortalité en taux annuels telle que présentée dans ce rapport est détaillée dans l'avis technique SSRF-20 (Guillemette et autres, 2020).

L'effet de la MCH sur la mortalité est complexe et implique une interaction avec d'autres facteurs comme les conditions climatiques. Cette particularité ainsi que le manque de suivi à long terme d'arbres affectés par la maladie rendent le phénomène difficile à modéliser. Les prévisions de mortalité effectuées à l'aide du modèle représentent une moyenne autour de laquelle une variation importante existe. D'autres travaux et des données de suivi à long terme seront nécessaires pour améliorer les équations présentées dans ce rapport.

2. Prédiction du recrutement du hêtre à grandes feuilles en contexte d'envahissement du sous-bois

La combinaison du phénomène du déclin de l'érable à sucre (ERS) à celui de la prolifération du HEG en sous-bois est source de préoccupation de la part des sylviculteurs et des aménagistes forestiers depuis plusieurs années (Direction de la recherche forestière, 2017). Afin de tenir compte de ce phénomène dans les pratiques forestières et d'ajuster les rendements en essences désirées, il s'avère important de pouvoir prévoir quelle quantité de nouvelles tiges de HEG les érablières recruteront.

Quatre différents aspects de cette question ont été abordés par le groupe de travail, soit :

- a) Quel modèle existant permet de mieux prévoir l'évolution de la surface terrière après la coupe et le recrutement de nouvelles tiges de dimension commerciale?
- b) Quelles hypothèses concernant les types de forêts de retour après une coupe partielle devraient être émises pour prévoir le rendement des peuplements dominés par l'ERS?
- c) Quelle quantité de HEG peut être laissée après une coupe partielle pour ne pas compromettre la régénération en ERS?
- d) Est-ce qu'un module de recrutement qui utilise les caractéristiques de la strate de gaules comme variables prédictives permettrait de mieux prévoir le recrutement en HEG et en ERS?

a) Évaluation des modèles existants

Prémisse

Les modèles de croissance Artémis ou SaMARE sont utilisés dans les peuplements d'ERS du sud du Québec pour produire des courbes de croissance servant au calcul des possibilités forestières ou pour simuler différentes stratégies sylvicoles et évaluer leur rentabilité économique, respectivement.

Au cours des dernières décennies, l'abondance du HEG dans les forêts d'ERS a augmenté, amenant les aménagistes forestiers à se préoccuper de la capacité des modèles de croissance existants à bien représenter la dynamique du couvert forestier. L'évaluation de la performance des modèles permettrait donc de conseiller les utilisateurs sur le modèle à employer en fonction de l'objectif visé.

Méthodologie

Pour évaluer la performance des modèles, les placettes-échantillons du réseau de mesure des effets réels de la coupe de jardinage 1995-1999 – MERCJ (Guillemette et autres, 2013) ont été utilisées. Les surfaces terrières marchandes et des recrues issues de ce réseau ont été comparées aux prévisions provenant de simulations des données après la coupe sur une période de 20 ans.

Les simulations ont été effectuées avec les modèles de croissance SaMARE-2014, Artémis 2014 version 3.0.6 et Artémis 2014 version 4.1.0. Dans le cas de ce dernier, trois types de simulations ont été effectuées soit avec les paramètres de base du modèle, soit en utilisant la fonction de mortalité pour la MCH, soit en utilisant les paramètres de recrutement basés sur les dernières mesures (4^e et 5^e décennal) et corrigés pour leur biais (paramètres tendance).

Les biais (valeur observée moins valeur prédite) de chaque combinaison de modèle, de version et de type de simulation ont été calculés. Une valeur positive du biais correspond à une sous-estimation alors qu'une valeur négative correspond à une surestimation de la variable étudiée. Le meilleur modèle est celui qui produit les valeurs de biais les plus près de 0 pour les variables étudiées.

Résultats

Simulation de la surface terrière

Les trois modèles réussissent à simuler de manière satisfaisante l'évolution de la surface terrière à la suite de coupes partielles (figure 3).

Aucun biais systématique de la surface terrière marchande n'a été remarqué pour l'ERS, c'est-à-dire que certains modèles montraient une légère surestimation tandis que d'autres, une sous-estimation. Cependant, le HEG et le bouleau jaune (BOJ) se sont avérés être sous-estimés par tous les modèles. Ces biais ont probablement comme conséquence de sous-estimer la proportion de la surface terrière issue de ces essences dans les analyses faites avec les modèles.

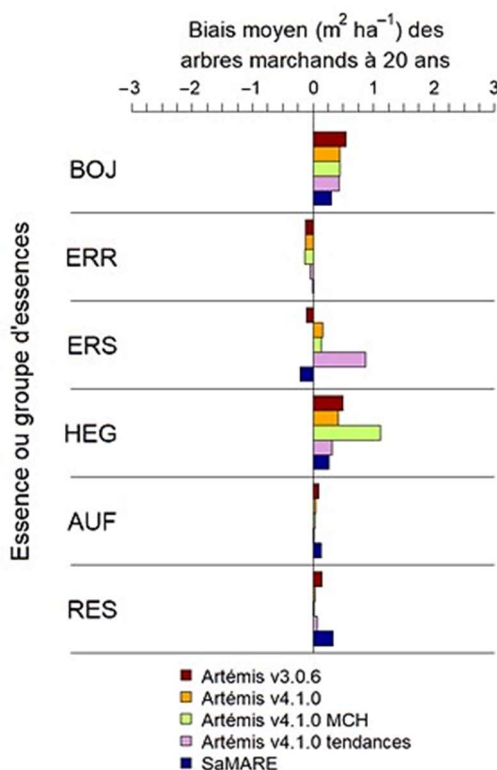


Figure 3 Biais de la surface terrière marchande par essence des modèles de croissance 20 ans après la coupe. ERR = érable rouge (*Acer rubrum*), AUF = autres feuillus, RES = essences résineuses.

Simulation du recrutement

Les différentes versions du modèle Artémis 2014, mis à part la version 4.1.0 utilisant les paramètres tendance, surestiment le recrutement d'ERS et sous-estiment le recrutement du HEG. Le modèle Artémis 2014 version 4.1.0 utilisant les paramètres tendance produit une estimation non biaisée du recrutement de toutes les essences. Le modèle SaMARE-2014, quant à lui, sous-estime légèrement le recrutement d'ERS, mais produit une estimation non biaisée du recrutement du HEG.

Discussion

Les travaux effectués ont permis de constater que les prévisions de surface terrière totale des modèles étaient peu biaisées. Par contre, de manière générale, les modèles surestiment le recrutement d'ERS et sous-estiment celui du HEG. Ces biais mèneront à long terme à des différences plus ou moins grandes entre la composition prédite et celle réellement observée. L'utilisation de la version plus récente d'Artémis 2014 (version 4.1.0 et plus récente) permet de minimiser cette différence sans l'éliminer.

totalemment. L'utilisation des paramètres tendance ajustés pour le recrutement permet de corriger ce biais dans le module de recrutement, mais entraîne une sous-estimation de la surface terrière totale d'ERS. SaMARE, de son côté, présente des biais comparables à ceux d'Artémis et possède l'avantage d'être plus performant pour évaluer la répartition par produit des arbres des érablières. Les résultats montrent que chaque modèle possède ses avantages et que le choix du modèle à utiliser dépend des questions étudiées.

Les détails de cette portion des travaux du groupe de travail peuvent être trouvés dans l'avis technique SSRF-24 (Bilodeau-Gauthier et autres, 2021a).

b) Hypothèses de retour après une coupe partielle pour les peuplements dominés par l'érable à sucre

Prémisse

La détermination des types de forêts (TYF) de retour après une coupe permet de prévoir la composition en essences du peuplement et d'attribuer la bonne courbe de production à un peuplement après la réalisation d'une intervention sylvicole pour que les volumes prédits correspondent à ceux observés sur le terrain. Cette étape est un élément important des calculs de possibilité forestière.

Dans un contexte d'envahissement par le HEG et de déclin de l'ERS, il est déjà observé que, dans plusieurs peuplements, les TYF de retour diffèrent en composition de ceux d'origine. La documentation à l'aide de données de suivi à long terme de coupe partielle permettra de suggérer une proportion de TYF de retour par type de peuplement afin que la planification représente la dynamique observée des peuplements après coupe partielle.

Méthodologie

Afin de bien évaluer la composition de retour, nous avons effectué la comparaison de la composition en surface terrière avant le traitement et 20 ans après la coupe des placettes-échantillons du réseau de mesure des effets réels de la coupe de jardinage 1995-1999 – MERCJ (Guillemette et autres, 2013).

Les placettes ont été classifiées en TYF sur la base de leur composition en surface terrière en utilisant les critères de regroupement utilisés par le BFEC dans les calculs de possibilité forestière 2023-2028 (tableau 2).

Tableau 2 Classification des peuplements en types de forêts (TYF)

Type de forêt (TYF)	Proportion de la surface terrière feuillue en ERS	Proportion de la surface terrière feuillue des autres essences
Es	ERS ≥ 75 %	n.d.
EsHg	ERS ≥ 50 %	HEG ≥ 15 %
EsHg_Fx	ERS < 50 %	HEG ≥ 15 %
EsBj	ERS ≥ 50 %	BOJ ≥ 20 %
EsFx	ERS ≥ 50 %	Autres feuillus

Résultats

La comparaison de la classification des placettes montre que 12 % des placettes classées en érablières à sucre (Es) avant la coupe ont évolué en érablières à hêtre (EsHg) ou en érablières à hêtres sans dominance d'érable à sucre (EsHg_Fx), alors que seulement 3 % des EsHg et des EsHg_Fx ont évolué vers le TYF Es (tableau 3).

Tableau 3 Évolution des types de forêts (TYF) 20 ans après la coupe de jardinage

Catégorie de tiges	TYF Départ	Nombre de placettes Départ	Nombre de placettes 20 ans après la coupe par TYF	
			Es	EsHg, EsHg, Fx
Arbres marchands	Es	68	50* (74 %)	8 (12 %)
	EsHg, EsHg_Fx	35	1 (3 %)	30* (86 %)
Recrues	Es	66	14 (21 %)	18 (27 %)
	EsHg, EsHg_Fx	35	2 (6 %)	29 (83 %)
Gaules	Es	68	16 (24 %)	22 (32 %)
	EsHg, EsHg_Fx	35	0 (0 %)	33 (94 %)

* En incluant les peuplements qui, au départ, correspondaient à d'autres TYF d'érablières avec essences feuillues compagnes, telles que EsBj et EsFx, mais qui étaient devenus Es après 20 ans, ce nombre montait à 62. De manière similaire, le nombre de placettes EsHg et EsHg_Fx passait alors à 39.

De manière globale, 20 ans après le traitement :

- La proportion de placettes dont les arbres marchands étaient de TYF Es a diminué de 7 % (68 placettes avant la coupe par rapport à 63 après la coupe, données non présentées).
- Les TYF EsHg et EsHg_Fx ont augmenté de 35 % (35 placettes avant la coupe par rapport à 47 placettes après la coupe.) parmi les arbres marchands. L'augmentation du nombre de placettes classées dans les groupes EsHg et EsHg_Fx est encore plus marquée lorsque l'analyse est faite en se basant sur les arbres recrus de dimension commerciale et sur la composition de la strate de gaules.

Discussion

Ces résultats montrent l'augmentation de la prévalence du HEG dans la composition des peuplements 20 ans après la coupe et ce phénomène devrait être pris en considération lors de l'attribution du TYF. Le maintien à long terme de tous les peuplements de TYF Es dans cette même catégorie pourrait mener à une surestimation de la proportion future d'ERS dans le couvert et à une sous-estimation de celle du HEG. L'augmentation des TYF EsHg et EsHgFx mènera également à une augmentation des problèmes associés à la MCH et à l'envahissement du sous-bois si aucune action sylvicole n'est entreprise pour en diminuer l'importance.

Des éléments d'information supplémentaires portant sur la détermination des TYF de retour se trouvent dans l'avis technique SSRF-24 (Bilodeau-Gauthier et autres, 2021a).

c) Quantité tolérable de hêtres à grandes feuilles laissée après une coupe pour ne pas compromettre la régénération en érable à sucre

Prémisse

Dans un contexte d'augmentation marquée de la présence et de l'abondance du HEG dans les peuplements d'ERS, prioriser la récolte du HEG et contrôler la présence de gaules de cette essence comptent parmi les méthodes privilégiées pour limiter sa prolifération. Cependant, il n'existe aucune balise permettant de cibler, à partir de la proportion de HEG marchand, les peuplements à risque d'expérimenter des problèmes d'envahissement par celui-ci. L'étude de la relation entre la proportion de HEG marchand avant la coupe et celle après la coupe, ainsi que le nombre de gaules d'HEG et d'ERS après la coupe, permettrait d'établir de telles balises.

Méthodologie

Nous avons tenté de définir des seuils de densité de gaules et d'arbres marchands de HEG qui pourraient être laissés sur pied, après la coupe, sans trop compromettre l'installation et la croissance de la régénération (gaules) de l'érable à sucre. En nous basant sur l'expérience des sylviculteurs et des aménagistes forestiers pour la réalisation d'un traitement de coupe des gaules de HEG en sous-bois, nous avons sélectionné pour notre étude un seuil maximum de 800 gaules de HEG à l'hectare comme limite à ne pas dépasser. Sur la recommandation de guides sylvicoles américains (Arbogast, 1957; Leak et autres, 2014), nous avons établi un seuil minimum de 1 000 gaules d'ERS à l'hectare comme cible à atteindre.

Avec le jeu de données du réseau de mesure des effets réels de la coupe de jardinage 1995-1999 – MERCJ (Guillemette et autres, 2013), nous avons développé des modèles permettant de prédire le nombre de gaules 20 ans après le traitement en fonction de la proportion de surface terrière marchande de HEG et d'ERS ainsi que de la proportion de gaules de HEG et d'ERS après la coupe.

Résultats

Pour l'ERS, le modèle paramétré a montré une relation positive entre la surface terrière marchande d'ERS avant la coupe et le nombre de gaules d'ERS 20 ans après la coupe.

Le modèle a aussi montré des relations négatives entre la surface terrière marchande de HEG avant la coupe et la densité de gaules d'ERS 20 ans après la coupe, ainsi qu'entre la densité de gaules d'HEG avant la coupe et la densité de gaules d'ERS 20 ans après la coupe.

Pour le nombre de gaules de HEG 20 ans après la coupe, le modèle a montré une relation positive tant avec la surface terrière marchande qu'avec le nombre de gaules de HEG avant la coupe. Cependant, un faible nombre de gaules de HEG n'assurait pas nécessairement une bonne régénération d'ERS, puisque plusieurs placettes présentant une faible surface terrière marchande de HEG, et un faible nombre de gaules de HEG avant le traitement, n'atteignaient pas le seuil de 1000 gaules ha⁻¹ d'ERS 20 ans après la coupe (figure 4).

Nos résultats semblent confirmer que les seuils maximums de 800 gaules de HEG à l'hectare ou de 15 % de la surface terrière marchande en HEG sont appropriés, puisque passé ces seuils, le nombre de gaules d'ERS descend presque toujours sous 1000 tiges/ha.

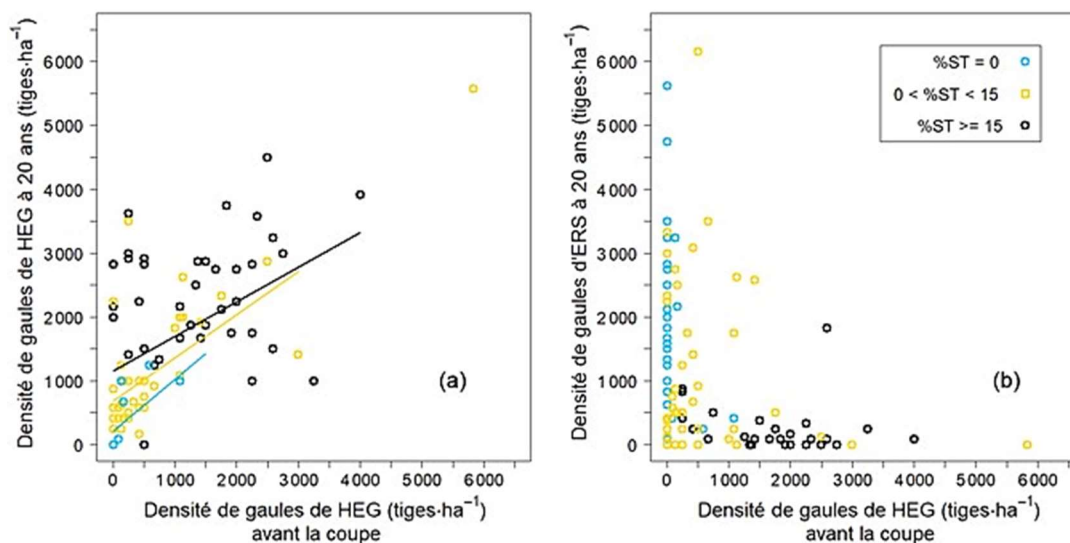


Figure 4 Densité des gaules de HEG (a) et d'ERS (b) 20 ans après la coupe en fonction du nombre de gaules de HEG avant la coupe et des trois niveaux de proportion de la surface terrière marchande de HEG avant la coupe

Discussion

Les seuils utilisés pour identifier les peuplements avec des problématiques de HEG, soit $\geq 15\%$ de la surface terrière marchande du peuplement ou ≥ 800 gaules ha^{-1} de HEG, constituent de bons indicateurs pour prédire de futurs problèmes de HEG et de régénération d'ERS si aucune action sylvicole n'est entreprise pour en diminuer de façon importante la proportion dans les peuplements après coupe. Par contre, plusieurs peuplements qui ne correspondaient pas à ces seuils de vulnérabilité présentaient également des problèmes de régénération 20 ans après la coupe (moins de 1000 gaules d'ERS à l'hectare).

Les travaux effectués n'ont pas permis d'évaluer l'effet de la récolte de HEG sur la présence de gaules de HEG et la régénération d'ERS 20 ans après la coupe. Cette situation est attribuable au peu de variation du prélèvement du hêtre dans notre jeu de données. Cette question ainsi que celle de l'effet du contrôle des gaules de hêtre sur la régénération d'ERS et le recrutement d'arbres marchands demeurent toutefois pertinentes. La poursuite d'études amorcées à la DRF pourrait contribuer à améliorer nos connaissances concernant ces questions.

Les détails de cette portion des travaux du groupe de travail peuvent être trouvés dans l'avis technique SSRF-26 (Bilodeau-Gauthier et autres, 2021b).

d) Utilisation des caractéristiques de la strate de gaules dans un module de recrutement

Prémisse

Dans leurs versions actuelles, les modules de recrutement des modèles de croissance Artémis et SaMARE utilisent, comme prédicteurs du recrutement, des données de station ainsi que les caractéristiques du couvert marchand de la placette, mais ils n'utilisent pas d'information provenant de la strate de gaules ou de la régénération.

L'hypothèse qui sous-tend ce travail est que, si un changement de composition survient dans le couvert des arbres marchands, ce changement se produira d'abord dans la strate de gaules. Conséquemment, en utilisant l'information provenant de la strate de gaules, on pourrait mieux prévoir le recrutement d'arbres de dimension commerciale à court et à moyen terme.

Méthodologie

L'équipe de travail a bénéficié des travaux de Baburam Rijal, un étudiant postdoctoral de l'Université du Québec à Rimouski sous la direction du professeur Robert Schneider. Dans le cadre de ce projet, des variables de la strate de gaules ont été testées pour améliorer le module de recrutement du modèle de croissance SaMARE.

Un module de recrutement utilisant des variables basées sur la strate de gaules a été paramétré, puis comparé à un module de recrutement qui n'utilisait pas les gaules comme variables prédictives. Les prévisions de ces deux modules de recrutement ont été comparées sur une période de simulation de 20 ans.

Des équations permettant de prévoir le nombre de gaules, la répartition de ce nombre entre les différentes espèces et le nombre de gaules des classes de diamètre de 6 et 8 cm ont été paramétrées. Nous avons utilisé les données ayant servi à paramétrer SaMARE en 2018 et qui ont été mises à jour avec les derniers mesurages des dispositifs expérimentaux de coupe de jardinage de la DRF et du RESEF (Réseau de surveillance des écosystèmes forestiers). Au total, 941 mesures provenant de 198 placettes-échantillons localisées dans des érablières et dont les dimensions variaient de 1600 à 5000 m² ont été utilisées.

Résultats

Les résultats montrent que, malgré un léger biais, les prévisions utilisant l'information provenant de la strate de gaules produisent des coefficients de détermination (R^2) plus élevés que ceux du module de recrutement qui ne les utilise pas ($R^2 = 0,37$ au lieu de 0,26, figure 5).

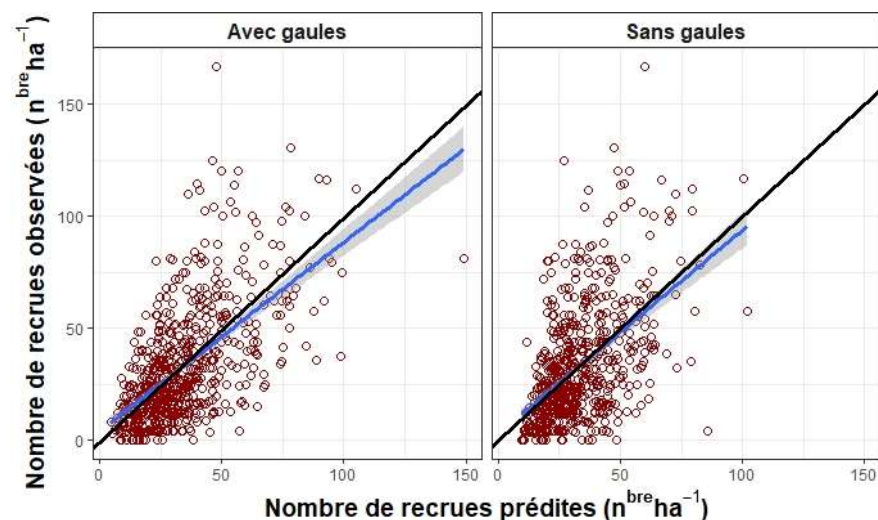


Figure 5 Comparaison des prévisions du nombre de recrues par période de cinq ans des modules de recrutement avec et sans gaules

De plus, les prévisions des principales espèces sont généralement plus précises et moins biaisées pour le module de recrutement qui utilise les gaules (R^2 variant de 0,24 à 0,44) que pour le module qui ne les utilise pas (R^2 variant de 0,14 à 0,36) (figure 6). Les résultats du travail effectué sur le module de recrutement du modèle de croissance SaMARE feront l'objet d'une publication scientifique (Rijal et autres [En prép.]).

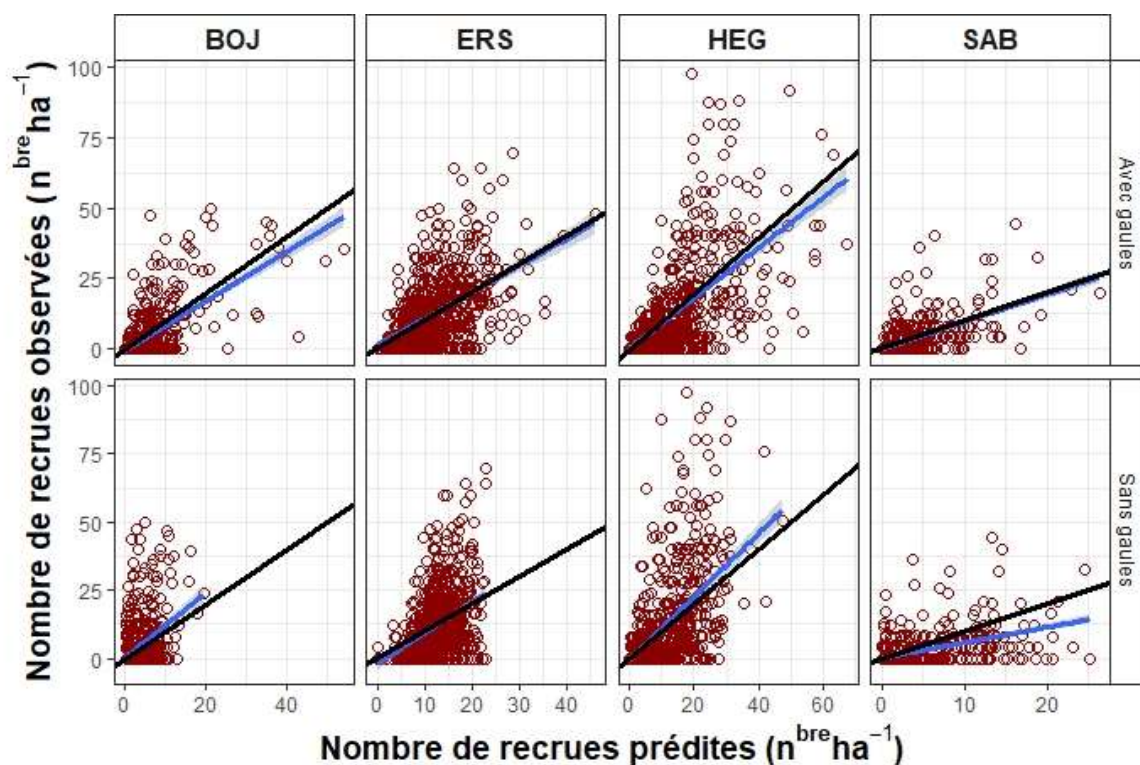


Figure 6 Comparaison des prévisions du nombre de recrues par période de cinq ans des modules de recrutement avec et sans gaules pour les principales essences. Régression linéaire des observations en fonction des prédictions (ligne bleue) et relation d'égalité entre les prévisions et les observations (ligne noire).

Discussion

Le module de recrutement qui utilise les gaules sera ajouté à la prochaine version du modèle de croissance SaMARE, tout en conservant un module de recrutement basé sur les caractéristiques du couvert marchand afin de permettre le fonctionnement du modèle sans inventaire de gaules. Cette nouvelle version du modèle permettra de prendre en compte plus efficacement l'effet de la composition de la strate de gaules sur le recrutement des arbres de dimension commerciale ($DHP > 9,0$ cm), si la densité de gaules à l'hectare est évaluée avec précision lors des inventaires de diagnostic ou de suivi forestier.

L'utilisation de cette version de SaMARE pourrait être particulièrement utile dans les peuplements où la composition du couvert d'arbres marchands diffère grandement de celle du gaulis. Elle pourrait également être utilisée afin de procéder à des études de cas où l'effet de la composition du gaulis sur le recrutement d'arbres marchands et la composition du couvert serait évalué.

Conclusion générale

L'envahissement des peuplements d'érable à sucre par le HEG est un phénomène bien présent et il pose des défis majeurs aux aménagistes forestiers. La mécanique entourant ce phénomène présente plusieurs facettes, telles que l'effet de la MCH sur le taux de mortalité et la compétitivité sous couvert des gaules de HEG qui leur permettent de supplanter celles de l'ERS. Le phénomène touche également à plusieurs aspects de l'aménagement forestier et de la sylviculture.

Les résultats de ces travaux devraient aider les aménagistes et les sylviculteurs à faire face au phénomène d'envahissement des érablières par le HEG. Par contre, de nombreuses incertitudes demeurent et les travaux devront se poursuivre afin, entre autres, d'améliorer les modèles de croissance existants et de documenter l'effet des traitements de contrôle du hêtre sur l'évolution de la composition des érablières.

Recommandations

Dans le contexte du calcul des possibilités forestières 2023-2028 pour la région de l'Outaouais, il a été recommandé d'effectuer une analyse de sensibilité du calcul selon différents scénarios de sévérité de la mortalité, rapportés par la littérature scientifique. Pour les travaux à venir, notamment ceux impliquant l'utilisation de modèles de croissance, nous formulons les recommandations suivantes :

- a) Utiliser le modèle de mortalité en présence de MCH intégré au modèle de croissance Artémis 2014 pour réaliser les courbes de rendement, lorsque la MCH est présente sur le territoire.
- b) Utiliser la version 4.1.0 ou celle la plus récente du modèle Artémis 2014 pour évaluer l'évolution de la surface terrière marchande. Cependant, le modèle de croissance SaMARE devrait être priorisé lorsque la qualité des arbres et son effet sur la répartition par produit sont des variables d'intérêt.
- c) Établir un seuil de 15 % de surface terrière marchande résiduelle et de 800 gaules ha^{-1} de HEG après coupe afin d'identifier les érablières qui présenteront vraisemblablement des problèmes de régénération en ERS.

- d) Lorsque le module de recrutement de SaMARE basé sur les gaules sera disponible et que des données sur le dénombrement des gaules par classe de diamètre seront également disponibles avec une précision suffisante, utiliser ce module de recrutement pour les simulations avec SaMARE lorsque l'on s'intéresse à la composition du recrutement.
- e) À moyen terme, poursuivre le travail pour s'adapter aux nouvelles connaissances et à l'évolution des besoins des sylviculteurs et des aménagistes forestiers, notamment par l'adaptation de modèles sensibles aux climats ainsi que l'installation et le suivi de dispositifs expérimentaux sur les méthodes de contrôle du HEG. La dynamique naturelle, les interventions sylvicoles et les changements globaux influencent la composition en essences des peuplements forestiers.

3. Évaluation et mise à jour des matrices de répartition par produits

Mandat

Les modèles et les matrices de répartition par produits (RPP) permettent de convertir, à partir du DHP et des principales caractéristiques observables des arbres-échantillons, les volumes de bois sur pied en différentes classes de produits (déroulage, sciage et pâte).

Les matrices de RPP permettent une bonne estimation de la quantité et de la qualité des différents produits présents dans une tige d'érable à sucre (ERS) ou de bouleau jaune (BOJ) pour une très grande partie du territoire forestier du Québec. Cependant, dans certaines régions écologiques, où le nombre d'arbres-échantillons servant à élaborer les modèles et matrices de RPP est relativement faible (p. ex. domaine de la sapinière à bouleau jaune), les précisions des estimations sont moindres pour ces deux essences.

De plus, pour les autres essences feuillues de moindre importance dans la base de données, tels le bouleau à papier (BOP), le hêtre à grandes feuilles (HEG), l'érable rouge (ERR) et le chêne rouge (CHR), le nombre d'arbres échantillons disponibles ne permet pas d'élaborer des modèles et matrices de RPP dont les niveaux d'estimation sont aussi bons que pour l'ERS et le BOJ.

Le mandat de l'équipe de travail consistait à évaluer les biais et la robustesse des différents modèles et matrices de RPP¹ afin de proposer des améliorations pour les arbres de 24 cm et plus. Afin d'arriver à cela, les travaux ont porté sur les trois volets suivants :

1. Évaluation du biais des modèles et matrices de RPP existants;
2. Validation de la justesse des modèles et matrices de RPP existants à l'échelle opérationnelle;
3. Mise à jour des modèles et matrices de RPP de l'ERS et du BOJ.

1. Évaluation du biais des modèles et matrices de RPP existants

Prémisse

Il existe plusieurs méthodes pour estimer la répartition du volume marchand brut (VMB) des arbres en différents produits, tels le déroulage, le sciage et la pâte. Des analyses préliminaires de la DRF indiquent que, de manière générale, les méthodes disponibles semblent être biaisées, d'où l'importance de pouvoir choisir la meilleure approche d'estimation.

Méthodologie

La comparaison des biais, c'est-à-dire l'écart constant entre le volume observé et le volume prédit, a été effectuée pour huit méthodes d'estimation de la répartition par produits du VMB d'un arbre-échantillon.

¹ La référence aux modèles ou matrices de RPP actuels ou existants correspond à ceux en vigueur depuis 2015, qui ont été implantés sur MÉRIS 2.3 ou les simulateurs Artémis 2014 et SaMARE de la plateforme Capsis (Havreljuk et autres, 2015a).

Quatre matrices de RPP sont disponibles :

1. Essence – DHP
2. Essence – DHP – Classes de qualité A, B, C ou D (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2021)
3. Essence – DHP – Groupe MS ou groupe CR (Boulet et Landry, 2015) – groupes de classes de qualité AB ou CD
4. Essence – DHP – MSCR – Classes d'utilisation O ou P (Ministère des Ressources naturelles, 2014)

Quatre modèles élaborés :

5. Essence – DHP
6. Essence – DHP – Classes de qualité A, B, C ou D
7. Essence – DHP – Classes M, S, C et R
8. Essence – DHP – Classes 1, 2, 3 et 4 (« vigueur » de Majcen et autres, 1990)

Afin de mieux refléter la pratique courante, la comparaison des biais a été faite sur la base des volumes nets prédits des billes de grande valeur établie par la sommation du volume des billes de déroulage et des billes de sciage des grades F1 et F2 (Petro et Calvert, 1976) pour les quatre essences ayant le plus d'intérêt, soit l'ERS, le BOJ, le BOP et le CHR (abréviation DF1F2).

L'évaluation du biais des modèles et des matrices de RPP s'est faite en deux étapes :

1. Les volumes nets prédits de chaque méthode d'estimation ont été calculés individuellement à partir des données observées des arbres et des billes publiées par Havreljuk et autres (2015a). Selon la méthode d'estimation choisie, cette base de données contient entre 3026 et 4352 arbres répartis entre 28 et 31 secteurs, respectivement. *Cette étape a permis de déterminer la méthode d'évaluation la moins biaisée qui a été utilisée comme méthode de référence pour la comparaison du biais relatif avec celui des sept autres méthodes d'estimation de la répartition par produits.*
2. La comparaison entre les méthodes a été faite à partir de données indépendantes contenant des observations d'inventaire recueillies 20 ans après des coupes de jardinage effectuées de 1995 à 1999 dans 213 territoires d'intervention répartis dans la province (Guillemette et autres, 2013). Cela a permis d'évaluer le biais des différentes méthodes en fonction des groupes de peuplements définis selon la végétation potentielle dominante, la région écologique et les perturbations récentes. L'analyse et les résultats détaillés ont été publiés dans l'avis technique SSRF-21 (Guillemette, 2020).

Résultats

Les volumes prédits à l'aide des matrices intégrées dans MÉRIS et des modèles intégrés dans Capsis ont donné des résultats similaires.

L'estimation la plus précise du volume DF1F2 a été obtenue en utilisant un modèle ou une matrice qui inclut la classe de qualité des arbres sur pied (ABCD).

À l'opposé, les plus grands biais ont été observés avec la classification MSCR, qu'elle soit seule ou en interaction avec le potentiel de bois d'œuvre (OP) (surestimations de 15,3 à 37,8 %). Toutefois, malgré un biais apparent de la matrice MSCR-OP à l'échelle de la province, les écarts entre les prévisions et les observations de cette matrice sont faibles dans les régions écologiques 2a, 3a et 3b (Tableau 4).

Tableau 4 Biais relatif de chaque méthode d'estimation des volumes nets des billes de grande valeur (DF1F2) des quatre essences étudiées pour les groupes de peuplements jardinés du projet de mesure des effets réels des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999

Groupe	Biais relatif des matrices par rapport à la matrice ABCD (%)				Biais relatif des modèles par rapport à la matrice ABCD (%)			
	ABCD	MS/CR-AB/CD	MSCR-OP	DHP	ABCD	MSCR	DHP	Vigueur
FE3 2a3a R07	—	1,0	-5,2	12,4	-0,5	-12,4	9,8	19,1
FE3 3a R08	—	5,5	-2,2	13,1	-1,1	-5,5	12,0	18,0
FE3 3b	—	8,0	4,2	18,6	0,0	-3,0	18,1	29,1
FE3 3c	—	-1,2	-12,4	20,5	-6,8	-7,5	13,0	9,3
FE3 3d4f	—	-8,1	-10,1	19,2	-7,1	-6,6	12,1	11,6
FE3 4bc	—	-0,6	-13,5	15,5	-5,2	-8,4	8,4	1,3
MJ1	—	-5,8	-21,3	16,8	-11,6	-8,4	8,4	-15,5
MJ2	—	0,7	-15,2	11,6	-12,3	-5,8	2,2	-15,9
Minimum	—	-8,1	-21,3	11,6	-12,3	-12,4	2,2	-15,9
Moyenne	—	0,6	-8,5	16,4	-5,6	-6,2	10,7	9,0
Maximum	—	8,0	4,2	20,5	0,0	-3,0	18,1	29,1

Note : La matrice ABCD a été choisie comme référence. Les volumes nets des billes DF1F2 sont basés sur des mesures prises 20 ans après la coupe. Les biais relatifs considérés comme notables (< -8,1 % ou > 8,1 %) sont en caractères gras. (Tiré du tableau 3b de l'avis technique SSRF-21 [Guillemette, 2020]). Un biais négatif représente une surestimation du volume net et un biais positif représente une sous-estimation du volume net.

Discussion et conclusion

L'évaluation du biais des modèles et matrices de RPP existants a montré que les classes de qualité des arbres sur pied (ABCD) permettent de mieux estimer le volume de bois d'œuvre des feuillus de grande valeur. Même si ce système n'est pas couramment utilisé en pratique, il présente l'avantage d'être spécifiquement conçu pour évaluer la qualité de la bille de pied, comparativement au système MSCR.

En l'absence de la donnée sur la classe de qualité et en attendant qu'une validation des modèles et matrices de RPP régionalisés soit effectuée, le biais résultant de l'utilisation des matrices ou modèles DHP, DHP-MSCR et DHP-MSCR-OP en vigueur depuis 2015 et non régionalisés peut être corrigé en utilisant des facteurs de correction.

2. Validation de la justesse des modèles et matrices de RPP à l'échelle opérationnelle

L'analyse visant à valider la justesse des modèles et matrices de RPP à l'échelle opérationnelle a été testée sur quatre chantiers opérationnels de l'UA 06471 qui ont été vendus aux enchères par le BMMB. Toutefois, ces analyses n'ont pas permis d'atteindre un niveau de confiance suffisant pour tirer des conclusions probantes sur les écarts entre les volumes attribués et ceux réellement récoltés. En effet, un nombre limité de chantiers répondaient aux critères recherchés à cause d'un manque de données nécessaires à notre projet ou des imprécisions associées à certaines données requises dans chaque chantier de récolte.

3. Mise à jour des modèles et matrices de RPP de l'érable à sucre et du bouleau jaune

Prémisse

Actuellement, les mêmes modèles et matrices de RPP sont utilisés pour estimer le volume et la qualité des produits des essences feuillues sur l'ensemble de la province du Québec. Une surestimation du volume de bois d'œuvre d'ERS est souvent rapportée, notamment pour des arbres récoltés dans les peuplements plus septentrionaux des domaines bioclimatiques de l'érablière à bouleau jaune ou provenant du domaine de la sapinière à bouleau jaune.

Une meilleure estimation de la RPP pourrait être obtenue en intégrant les variables régionales dans les modèles et matrices de RPP provinciaux.

Méthodologie

Base de données

La base de données de tronçonnage qui sert à produire les modèles et matrices de RPP se compose d'un regroupement de différentes sources de données du MFFP, dont les plus anciennes ont été mises en place au début des années 2000.

Afin d'améliorer la représentativité provinciale et la répartition des sites qui étaient sous-représentés (érablières nordiques), la base de données de tronçonnage a été bonifiée, depuis 2018, par l'ajout de 10 nouveaux sites et plus de 800 arbres, pour un total de 2624 ERS et 2010 BOJ d'un DHP supérieur à 23 cm. Dans un souci d'uniformiser la prise de données, l'échantillonnage et le mesurage des nouveaux secteurs ont été faits selon l'approche décrite dans l'avis technique SSRF-8 (Havreljuk et autres, 2015b).

D'autres ajustements ont été apportés à la base de données de tronçonnage afin de prendre en compte l'effet de certaines lacunes d'échantillonnage. Parmi les ajustements les plus importants, nous avons diminué le poids d'un secteur atypique situé près de Mont-Laurier dans la région écologique 3b qui représentait plus de 20 % de l'ensemble des données pour l'érable à sucre et qui était responsable d'une surestimation des volumes dans la matrice de RPP provinciale. Son poids dans la base de données a été réduit en excluant aléatoirement une partie des données de ce secteur lors des analyses.

Mise à jour des modèles et matrices de RPP

La mise à jour des modèles de répartition par produits a été effectuée selon la même approche que celle utilisée pour les modèles existants (Fortin et autres, 2009; Havreljuk et autres, 2015a). Les modèles ont

été étalonnés individuellement pour chaque essence en fonction du DHP seul ou d'une combinaison du DHP et de la classe de qualité (ABCD) de chaque arbre-échantillon présent dans la base de données de tronçonnage, en incluant tous les nouveaux arbres-échantillons ajoutés récemment.

Nous avons également testé *l'effet de la hauteur totale de l'arbre ainsi que des variables climatiques et écologiques* dans les modèles. Pour les arbres pour lesquels il n'y avait aucune hauteur mesurée, celle-ci a été estimée à partir de la hauteur moyenne des inventaires décennaux pour une essence, un DHP et une unité d'échantillonnage donnée. Les variables climatiques moyennes de chaque site ont, pour leur part, été extraites de l'outil BioSIM.

Enfin, nous avons testé l'importance *des domaines et sous-domaines bioclimatiques ainsi que des régions écologiques* dans les modèles. Étant donné la répartition des observations et leur nombre limité, nous avons groupé certaines régions écologiques afin de créer des classes écologiques plus robustes pouvant être incluses dans les modèles (Tableau 5). Ainsi, chaque région écologique devait satisfaire aux deux critères suivants : 1) comporter au moins trois sites de 30 observations par site et 2) inclure au moins 120 observations au total.

Tableau 5 Groupement des régions écologiques utilisées dans les modèles et matrices de RPP. Les caractères en italique représentent les régions écologiques pour lesquelles il n'y avait aucune observation dans la base de données de tronçonnage.

Essence	Région écologique groupée	Régions écologiques correspondantes
ERS	2O	1a, 2a, 2b, 2c
	3O (a)	3a
	3O (b)	3b, 3c
	4O (b)	4a, 4b
	4O (c)	4c
	4E	3d, 4d, 4e, 4f, 4g, 4h
BOJ	3O	1a, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b
	3E	3c, 3d
	4O (b)	4a, 4b
	4O (c)	4c
	4E	4d, 4e, 4f, 4g, 4h

Les prévisions issues des modèles ont permis d'estimer les volumes nets (m³) des produits de déroulage et de sciage (F1, F2 et F3) ainsi que de la pâte (P, incluant les billons F4), en fonction des caractéristiques des arbres. Par la suite, elles ont été converties en proportion (%) de produits de déroulage, de sciage et de pâte, mais aussi de carie et de non-utilisation (NU) en fonction du VMB de chaque arbre-échantillon.

Enfin, la classe résiduelle des branches marchandes (BM) est fixe et provient d'une note d'information. L'ensemble des produits sont réajustés de façon à ce que leur somme corresponde au VMB.

L'analyse et les résultats seront prochainement publiés dans une note de recherche (Havreljuk et autres [En prép.]).

Résultats

L'ajout de nouveaux sites et d'arbres dans la base de données de tronçonnage a amélioré la distribution des données à l'échelle de la province et a permis de mieux caractériser le domaine de la sapinière à bouleau jaune.

Parmi les variables testées, l'ajout de la *hauteur totale de l'arbre* a, dans certains cas, légèrement amélioré les prévisions des modèles. Toutefois, compte tenu de son impact limité et dans un souci de simplification des modèles et de leur utilisation, *cette variable n'a pas été incluse dans les modèles finaux*.

En ce qui concerne les données climatiques liées à la localisation des sites, aucune variable testée n'a permis d'améliorer significativement l'ajustement du modèle. Les *meilleurs résultats, autant pour l'ERS que pour le BOJ, ont été obtenus en ajoutant la région écologique groupée comme variable explicative dans les modèles*.

Pour l'ERS, la proportion de sciage a diminué pour l'ensemble des secteurs analysés (Tableau 6). La baisse la plus importante de la proportion de sciage a été observée dans les régions écologiques du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune, où cette proportion de sciage représente autour de 18 % du VMB de l'arbre, soit environ 50 % de moins que pour la matrice de RPP provinciale actuelle. Cette diminution du sciage a entraîné une hausse considérable du volume de pâte ou des autres produits (carie, BM et NU). D'autre part, la régionalisation des modèles et matrices de RPP a eu le moins d'impact dans les régions écologiques du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune.

Tableau 6 Proportion moyenne de sciage, de pâte et d'autres produits dans le volume marchand brut (VMB) de l'érable à sucre sur pied dans 20 unités de compilation de l'UA 064-71 selon la matrice provinciale actuelle et la nouvelle matrice régionalisée en utilisant le modèle de classe de qualité (ABCD). La proportion moyenne inclut tous les arbres dont le DHP est supérieur à 23 cm.

Région écologique groupée	Sciage F1 F2 F3		Pâte ±F4		Carie-BM-NU	
	Moyenne (%)	Écart matrice RPP prov. (%)	Moyenne (%)	Écart matrice RPP prov. (%)	Moyenne (%)	Écart matrice RPP prov. (%)
2O	29 %	-20 %	50 %	26 %	22 %	-13 %
3O (3a)	32 %	-11 %	35 %	-11 %	33 %	33 %
3O (3b)	34 %	-7 %	36 %	-8 %	30 %	22 %
4E	19 %	-47 %	53 %	36 %	27 %	11 %
4O (4b)	18 %	-50 %	54 %	37 %	28 %	15 %
4O (4c)	18 %	-49 %	37 %	-4 %	44 %	80 %
Matrice RPP provinciale actuelle	36 %		39 %		25 %	

Pour le bouleau jaune, la plus forte diminution de la proportion de sciage a été observée dans les régions écologiques du sous-domaine 4E (-38 %), suivies par la région écologique 4b (-26 %) et les régions écologiques du sous-domaine 3O (-19 %) (Tableau 7). Des écarts importants entre les prévisions du modèle régionalisé et celles de la matrice de RPP provinciale ont également été observés pour les autres catégories de produits, sans toutefois qu'on puisse établir une tendance générale entre les régions écologiques de la province.

Tableau 7 Proportion moyenne de sciage, de pâte et d'autres produits dans le volume marchand brut (VMB) du bouleau jaune sur pied dans 20 unités de compilation de l'UA 064-71 selon la matrice provinciale actuelle et la nouvelle matrice régionalisée en utilisant le modèle de classe de qualité (ABCD). La proportion moyenne inclut tous les arbres dont le DHP est supérieur à 23 cm.

Région écologique groupée	Déroutage + Sciage F1 F2 F3		Pâte+F4		Carie-BM-NU	
	Moyenne (%)	Écart matrice RPP prov. (%)	Moyenne (%)	Écart matrice RPP prov. (%)	Moyenne (%)	Écart matrice RPP prov. (%)
3E	34 %	8 %	16 %	-57 %	50 %	61 %
3O	25 %	-19 %	31 %	-17 %	43 %	40 %
4E	19 %	-38 %	42 %	10 %	39 %	26 %
4O (4b)	23 %	-26 %	29 %	-23 %	48 %	55 %
4O (4c)	32 %	3 %	13 %	-66 %	55 %	77 %
Matrice RPP provinciale actuelle	31 %		38 %		31 %	

Discussion et conclusion

L'ajustement de la base de données de tronçonnage et l'ajout de nouveaux sites, principalement dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune, ont permis d'améliorer la représentativité des données à l'échelle provinciale, principalement pour l'ERS.

L'utilisation de la région écologique dans les nouveaux modèles et matrices de RPP a montré des différences importantes de la qualité des volumes de billes de l'ERS et du BOJ à travers la province. La baisse de près de 50 % du volume de billes de sciage pour l'ERS situé dans les régions écologiques du domaine de la sapinière à bouleau jaune par rapport à la matrice de RPP existante est importante. Ainsi, les changements apportés par ces nouvelles RPP impliquent qu'il ne faudrait pas les utiliser avec d'anciens outils utilisant le volume par produits, comme une des régressions du CIMOTFF de 2014 (Saucier et autres, 2014) qui prédit le volume DF1F2 en fin de rotation selon la surface terrière résiduelle en CFC parmi les arbres d'un DHP de 24 à 44 cm.

Par ailleurs, il est possible que les estimations de volume et de qualité de la RPP soient imprécises ou biaisées pour certains secteurs de la province, étant donné qu'il reste encore plusieurs régions écologiques où aucun échantillonnage n'a été effectué et qui ont été associées à un groupement voisin. Ainsi, le groupement des régions écologiques pourrait être modifié lors des prochaines mises à jour des modèles et matrices de RPP, en fonction de la disponibilité de nouvelles données.

Recommandations

Nous formulons les recommandations suivantes :

- a) Privilégier l'utilisation d'un modèle ou d'une matrice de RPP qui tient compte de la classe de qualité ABCD de l'arbre.
- b) Planter et utiliser les nouveaux modèles et matrices de RPP régionalisés dans l'ensemble des outils du MFFP (MÉRIS, Capsis, DICA), principalement pour l'ERS dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune.

Toutefois, en attente de la diffusion et de l'implantation des nouveaux modèles et matrices de RPP régionalisés, le biais des matrices et modèles existants peut être corrigé en fonction des résultats présentés dans l'avis technique SSRF-21 (Guillemette, 2020).

À moyen et long terme :

- c) Mettre en place un projet qui permettrait un suivi de validation précis afin de comparer la qualité des volumes lors du diagnostic sylvicole, les volumes résiduels du peuplement traité et les volumes récoltés par rapport aux prévisions des modèles et matrices de RPP, cela à l'échelle des chantiers de récolte.
- d) Refaire l'évaluation du biais des nouveaux modèles et matrices de RPP régionalisés afin d'avoir un meilleur portrait global de la justesse des modèles pour l'ensemble de la zone tempérée nordique, ce qui permettrait de mieux orienter les échantillonnages futurs.
- e) Poursuivre les travaux suivants :
 - i. Documenter et quantifier les écarts potentiels entre la qualité des billes et leur volume issus du classement de Petro et Calvert (1976) et des autres normes de tronçonnage pour apporter, le cas échéant, des ajustements aux modèles et matrices de RPP.

Le tronçonnage et la RPP de tous les arbres feuillus de la base de données sont basés sur le système de Petro et Calvert (1976) qui est comparable aux normes américaines du classement des billes. Ce système vise à extraire le maximum de qualité en termes de grades de sciage d'une bille. Il est utilisé comme référence dans les études de tronçonnage, car il permet un lien direct entre les catégories de sciage des billes et leur rendement en différents grades de sciage, qui sont nécessaires pour établir la valeur extraite d'une bille et d'un arbre. Toutefois, cette approche diffère de la norme de classification des billes des essences feuillues du *Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État* (Bureau de mise en marché des bois, 2021b) qui est couramment utilisée à l'échelle opérationnelle. Même si les normes de mesurage Petro et Calvert et du Manuel présentent plusieurs similitudes, la RPP issue des deux systèmes pourrait être différente. De plus, plusieurs usines de transformation utilisent leur propre

norme de tronçonnage qui vise parfois à maximiser le volume, plutôt que la qualité extraite de chaque bille.

- ii. Mieux caractériser le volume des branches marchandes (BM) qui dépend directement du VMB de l'arbre et non d'un mesurage en forêt. Ce volume peut inclure aussi, dans certains cas, la matière ligneuse qui devrait être associée à la non-utilisation (NU) plutôt qu'aux branches marchandes, lorsque le volume laissé sur le parterre de coupe provient du tronc principal (p. ex. souche plus haute que les 15 cm à partir du plus haut niveau de sol réglementaires). Afin d'améliorer et de faciliter la caractérisation du VMB d'un grand nombre d'arbres feuillus, l'acquisition de données futures devrait également explorer des méthodes automatisées, en utilisant, notamment, le Lidar terrestre ou mobile.
- iii. Inclure, dans le développement futur des modèles et matrices de RPP, les variables à l'échelle de peuplements qui pourraient avoir un effet sur le panier de produits, comme l'historique de la récolte ou la surface terrière du peuplement. Des travaux de recherche sont en cours pour, d'une part, reconstituer l'historique de croissance et de perturbations des peuplements dans la base de données de tronçonnage et, d'autre part, intégrer ces variables dans les modèles. Ultiment, ces travaux devraient permettre de mieux comprendre la variabilité à l'échelle du site pour une région donnée et son effet sur la qualité des volumes récoltés.
- iv. Explorer le possible développement d'une méthode de classification des arbres, simple et moins coûteuse, afin d'identifier rapidement par un inventaire terrestre les superficies dont la quantité de bois d'œuvre de feuillu de grande valeur serait insuffisante. Cette approche pourrait regrouper les défauts indicateurs les plus déterminants des méthodes ABCD et MSCR, tout en permettant une prédiction acceptable de la qualité des billes.

4. Détermination des diamètres à maturité financière des principales essences forestières de la zone tempérée nordique

Mandat

Déterminer les DMF de 15 essences forestières de la zone tempérée nordique du Québec ainsi qu'effectuer une importante mise à jour des résultats de l'ERS et du BOJ.

Prémisse

Le DMF est le DHP d'un arbre d'une essence forestière (groupe d'arbres), sur une période de temps et dans un environnement spécifiques, lorsque l'accroissement de ce diamètre ne génère plus suffisamment de gains en valeur financière pour compenser les risques de perte d'une partie de l'arbre par dégradation du tronc ou de perte de l'arbre par mortalité.

Comme il a déjà été démontré pour l'ERS et le BOJ lors du CIMOTFF de 2014, le DMF de chacune des 15 essences ciblées devrait varier selon les régions ou groupes de régions écologiques.

Méthodologie

La présente section reprend le résumé de la méthode et des résultats publiés dans le rapport de Saucier et autres (2021). Les détails complets de la méthodologie seront publiés dans Guillemette et autres (en préparation a).

Recrutement des placettes :

Les DMF de l'ERS et du BOJ ont été révisés notamment pour prendre en compte la classe MSCR et la classe de qualité des arbres sur pied (ABCD), mais aussi pour inclure, lorsque possible, des différences régionales selon trois regroupements de régions écologiques.

Les mesures ont été prises de 2003 à 2019 sur 77 987 arbres répartis dans 2 757 placettes. L'intervalle entre deux mesures variait de 4 à 15 ans (moyenne = 10,9 ans). Le Tableau 8 montre le nombre d'arbres répartis par essence et pour chacun des trois grands regroupements de régions écologiques.

Nous avons rassemblé les données, validées en janvier 2021, provenant des trois réseaux de placettes permanentes suivants :

1. Réseau PEP de placettes-échantillons permanentes de la Direction de l'inventaire forestier;
2. Réseau MERCJ de mesure des effets réels de la coupe de jardinage 1995-1999 de la DRF;
3. Réseau DRFCJ d'expérimentation de la coupe de jardinage de la DRF.

Nous avons retenu les placettes suivantes :

- Placettes dont les évolutions d'arbres, entre deux périodes de mesures, dont la classe MSCR et la classe de qualité des feuillus (ABCD), ont été notées. Environ un tiers de ces arbres ont évolué à la suite de la pratique d'une coupe partielle;
- Placettes uniquement situées sur des végétations potentielles généralement vouées à de possibles coupes partielles, soit FC1, FE1, FE2, FE3, FE4, FE5, FE6, MJ1, MJ2, MS1, RP1 et RT1.

Tableau 8 Nombre d'arbres à l'étude par essence et par regroupement de régions écologiques

Essence	Regroupement de régions écologiques			Total
	2a 3abc	4abcd 5abe	1a 2b 3d 4fgh 5fghi	
BOJ	4 728	3 450	1 353	9 531
BOP	1 842	2 080	1 711	5 633
CET	142	1	15	158
CHR	1 262	14	100	1 376
EPB	1 078	706	572	2 356
EPR	667	164	203	1 034
ERR	4 056	1 528	2 165	7 749
ERS	19 413	5 636	5 015	30 064
PEG	727	35	109	871
PET	755	291	600	1 646
PIB	875	89	162	1 126
PRU	1 153	38	312	1 503
SAB	6 155	3 160	3 544	12 859
THO	880	267	201	1 348
TIL	673	1	59	733
TOTAL	44 406	17 460	16 121	77 987

Valeurs financières des produits forestiers (VFpf)

Les *valeurs financières tendance des produits forestiers* ont été extraites à l'aide de la version 2.2 de l'outil MÉRIS (avril 2019). Les produits sont le *déroulage* (D), le *sciage conventionnel* (F1F2F3) et la *pâte* (P). Dans le cas des feuillus, le sciage conventionnel est composé des billes des grades F1, F2 et

F3. Cependant, les billons de *sciage non conventionnel* de grade F4 ont été ajoutés au produit de la pâte.

Par défaut, la *répartition par produits du volume marchand brut de l'arbre* est la même que celle publiée dans la version 2.2 de MÉRIS selon l'essence, le diamètre et la qualité (pour les feuillus). Cependant, deux modifications ont été apportées à la répartition par produits des essences suivantes :

- L'ERS et le BOJ : ces matrices ont été remplacées par les nouvelles matrices de répartition par produits calculées par région écologique grâce à de nouvelles données couvrant davantage de territoires (Havreljuk et autres [En prép.] et le chapitre 3). Lorsqu'il n'y avait pas de modèle disponible dans une région écologique donnée, une hypothèse a été posée pour associer la matrice d'une autre région écologique.
- Le BOP, l'ERR et le CHR : ces matrices ont été remplacées par une version révisée par classe de 2 cm de DHP, comme dans la version 2.3 de MÉRIS (mai 2021).

Valeur financière totale d'un arbre (VFtot)

La *valeur financière tendance totale d'un arbre* selon son diamètre, son essence et, dans certains cas, selon sa qualité et sa région écologique, a été calculée. Cela correspond à la somme des *valeurs financières des produits forestiers* contenues dans un arbre. Cette donnée est utile pour déterminer si un arbre a une valeur financière intéressante à un diamètre où le modèle d'évolution prédit qu'il perd de la valeur en bois d'œuvre (EFVbo).

Selon la plus récente enquête sur les coûts d'approvisionnement de l'industrie du sciage au Québec (Groupe DDM, 2021), nous considérons que les arbres doivent atteindre une VFtot d'environ 69 \$/m³ afin de couvrir le coût moyen d'approvisionnement en coupe partielle. Sachant que la variabilité est grande autour de cette moyenne, nous avons fixé le seuil de VFtot à 60 \$/m³ pour juger si un arbre est minimalement intéressant pour l'industrie du sciage. Sous ce seuil, la VFtot est presque exclusivement issue des bois destinés à la pâte (p. ex. 55 \$/m³ pour l'érable à sucre). Rappelons que ce seuil de 60 \$/m³ est un seuil arbitraire utilisé ici dans le but de faciliter l'analyse des résultats.

Évolution de la valeur financière en bois d'œuvre (EVFbo)

La *valeur financière en bois d'œuvre* (VFbo) d'un arbre est composée du déroulage (D) et du sciage conventionnel (F1F2F3). La VFbo de chaque arbre a été calculée au début et à la fin de la période de mesure, puis l'évolution financière annuelle de l'arbre (EVFbo) a été calculée en divisant l'écart entre sa VFbo finale et sa VFbo initiale par le nombre d'années écoulées entre les deux mesures. Ainsi, un arbre dont la VFbo serait passée de 20 à 30 \$ sur une période de 10 ans aurait une évolution de +1 \$/année, tandis que, si le même arbre avait été retrouvé mort après 10 ans, son évolution aurait été de -2 \$/année.

Les EVFbo des arbres ont été modélisées par essence. Pour l'ERS et le BOJ, elles ont aussi été modélisées par classe MSCR (classes M, S ou groupe CR) et de qualité (classe C ou groupe AB) pour l'ensemble de la province, de même que pour les trois regroupements de régions écologiques suivants :

1. **2a 3abc** : Régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c des domaines de l'érablière situés sur le Bouclier canadien.

2. **4abcd 5abe** : Régions écologiques 4a, 4b, 4c, 4d, 5a, 5b et 5e des domaines de la sapinière situés sur le Bouclier canadien.
3. **1a 2b 3d 4fgh 5fghi** : Régions écologiques 1a, 2b, 3d, 4f, 4g, 4h, 5f, 5g, 5h et 5i situées dans la vallée du Saint-Laurent et la chaîne des Appalaches.

Il faut prendre note que toutes les données modélisées en valeur par arbre (\$) ont été converties en proportion (%) de leur valeur initiale afin de faciliter les comparaisons. De plus, les résultats des modèles ont été interprétés jusqu'à un DHP correspondant à un minimum de 30 observations de croissance sur des arbres ayant un DHP égal ou supérieur à celui-ci. Cette précaution a été utilisée pour minimiser le risque que les DMF changent de manière importante lors d'une éventuelle révision avec plus d'observations.

Calcul du DMF

Rappelons que le DMF est le seuil de diamètre à partir duquel l'EVFbo moyenne des arbres obtient un rendement < 0 %/an. Les DMF ont été calculés sur une période moyenne d'observation de 11 ans, mais la prise de décision se fait plutôt pour un intervalle de temps de 30 ± 5 ans entre les coupes partielles dans un peuplement. Le DMF₃₀ est estimé à 30 ans selon une projection du DMF₁₁ calculé à 11 ans. De manière générale, la projection est la suivante : $DMF_{30} = DMF_{11} - 4$ cm, et ce, sur la base des résultats de travaux précédents (Guillemette, 2016).

Résultats

Pour simplifier la présentation des résultats, l'accent a été mis sur le calcul du DMF et de son intervalle de confiance.

Les tableaux 9 à 15 présentent une synthèse des résultats pour les combinaisons étudiées en lien avec la détermination des DMF. Globalement, nous constatons qu'il y a beaucoup d'arbres dont la VFtot est inférieure à 60 \$/m³, particulièrement certaines essences ou des arbres de petit ou moyen diamètre des essences de meilleure valeur (p. ex. ERS, BOJ, BOP ou CHR, etc.). Cependant, comme c'est un assortiment d'arbres de valeurs différentes qui est récolté, c'est le panier de produits toutes essences qui devrait être considéré à l'échelle du peuplement, voire à l'échelle du chantier.

Interprétation des tableaux

Exemple 1

Voici un exemple de résultats détaillés pour l'ERS de groupe de classes CR et de groupe de qualité AB dans les *régions écologiques 2a 3abc* (figures 7 et 8). Le taux annuel moyen de changement de EVFbo passe d'un peu plus de 1 % à un diamètre de 34 cm à moins de 0 % à un diamètre de 50 cm (DMF₁₁). Les intervalles de confiance à 95 % croisent le seuil de 0 % d'accroissement à des diamètres de 48 et 52 cm. La projection de ces seuils sur 30 ans donne un DMF₃₀ moyen de 46 cm et un intervalle de 44 à 48 cm (tableau 10).

À un diamètre de 46 cm, un tel érable à sucre de groupe de qualité AB détient une VFtot d'environ 80 à 85 \$/m³; ce qui pourrait rapporter un bénéfice de 11 à 16 \$/m³. Cependant,

- à un diamètre légèrement supérieur au DMF, le taux annuel de perte de EFVbo est quand même faible (voir la pente de la courbe, figure 7), ce qui peut justifier de conserver de tels érables à sucre sur pied pour d'autres raisons sylvicoles;
- à un diamètre légèrement inférieur au DMF, le taux annuel de gain de EFVbo est quand même faible (< 1 %/année). Cela vient justifier la récolte de tels arbres lors d'une coupe partielle au profit d'arbres de plus faible diamètre qui présentent un taux d'accroissement en EFVbo plus élevé.

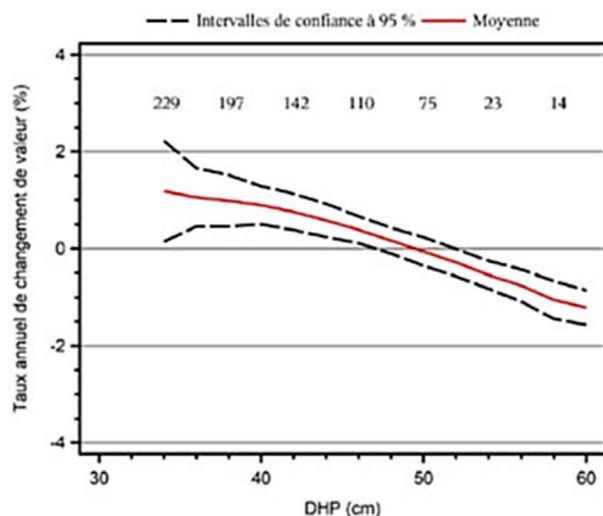


Figure 7 Taux annuel de changement de valeur du bois d'œuvre (EFVbo) sur 11 ans (moyenne et intervalles de confiance à 95 %) de l'ERS de groupe de classes CR et de groupe de qualité AB dans le regroupement de régions écologiques 2a 3abc selon le DHP initial de l'arbre. Les nombres inscrits au-dessus des courbes représentent le nombre d'observations dans une classe de DHP sur deux.

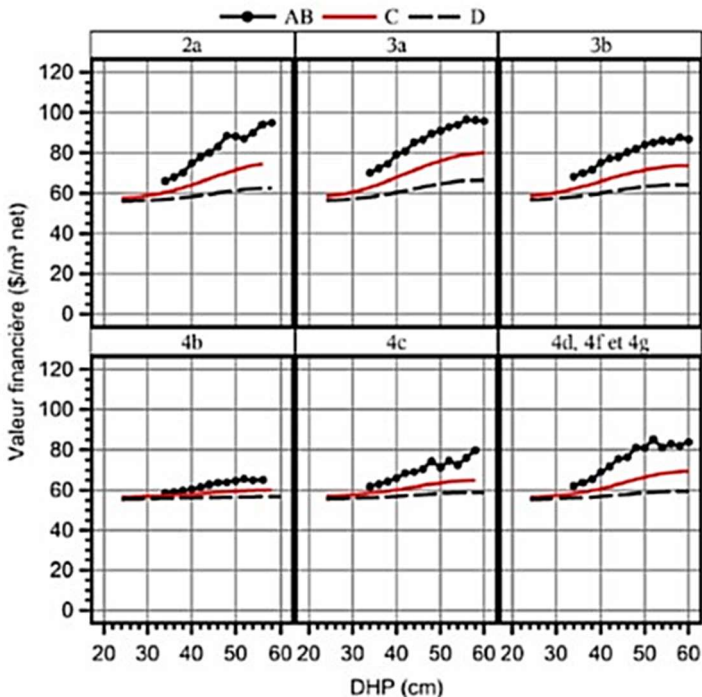


Figure 8 Valeur financière totale de l'arbre (VFtot) pour l'industrie (\$/m³ net) de l'ERS selon la classe de qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou D), par région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c ou 4d, 4f et 4g)

Pour les régions écologiques non mentionnées dans la Figure 8, nous avons utilisé la répartition par produits provenant d'une région écologique la plus semblable possible. Par exemple, la répartition de la région écologique 3b a été utilisée dans les régions écologiques 3c et 3d.

Exemple 2 :

La VF_{tot} du BOJ et de l'ERS par région écologique et par classe MSCR est présentée aux figures 9 et 10 (toutes classes de qualité ABCD confondues). Elles montrent une tendance générale à un plafonnement de la valeur unitaire à un DHP supérieur à 50 cm. Notons que le nombre d'observations devient très faible à un DHP de près de 70 cm, ce qui limite la capacité à détecter une baisse de valeur unitaire pour de grands DHP et occasionne une grande variabilité entre des classes de DHP contiguës.

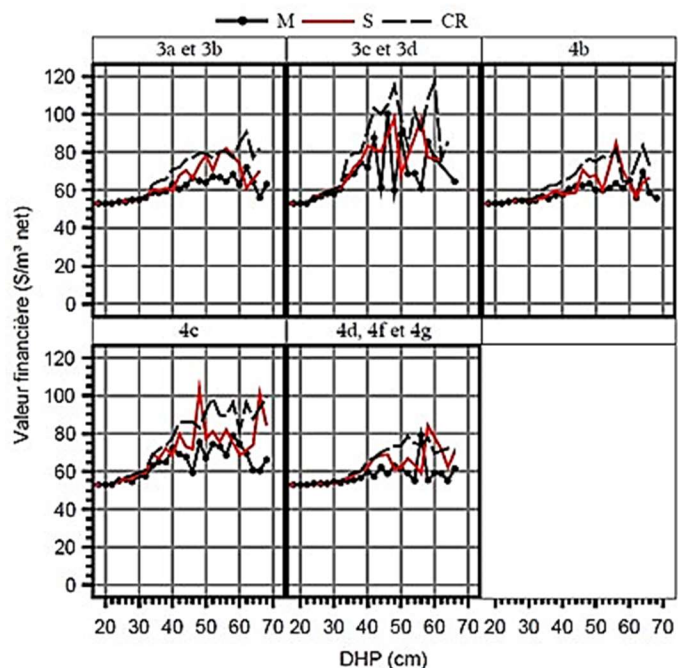


Figure 9 Valeur financière totale de l'arbre (VF_{tot}) pour l'industrie (\$/m³ net) du BOJ selon la classe de priorité de récolte de l'arbre sur pied (M, S ou CR), par région écologique (3a et 3b, 3c et 3d, 4b, 4c ou 4d, 4f et 4g)

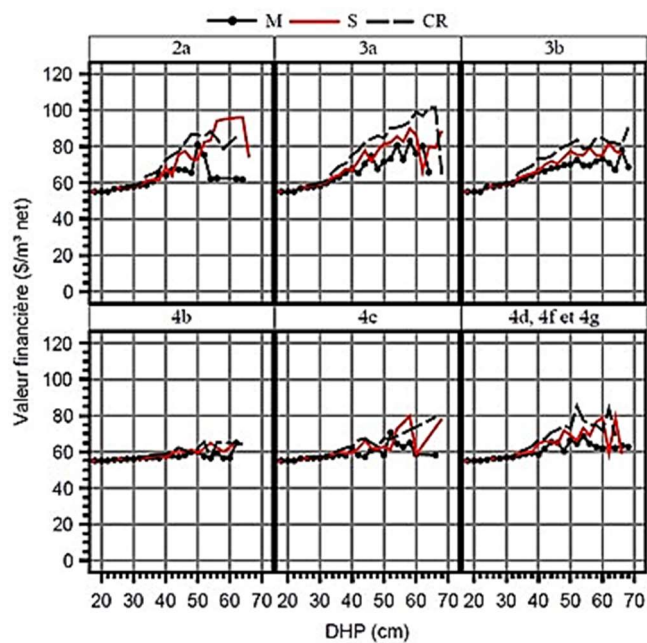


Figure 10 Valeur financière totale de l'arbre (VFtot) pour l'industrie (\$/m³ net) de l'ERS selon la classe de priorité de récolte de l'arbre sur pied (M, S ou CR), par région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c ou 4d, 4f et 4g)

Tableau 9 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour 11 essences ou groupes d'essences calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière actuelle pour le scieur de feuillus (revenu brut ou net [= brut moins le coût de récolte de 69 \$/m³] des arbres à 30 ans, le diamètre minimal pour obtenir une VF_{tot} de 60 \$/m³ et des notes

Ess.	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VF _{tot} (\$/m ³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VF _{tot} = 60 \$/m ³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
PIB	> 60 ? ^b	S. O.	> 56 ?	S. O.	150	81	24	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Très faible, encore en croissance
CHR	> 54 ?	S. O.	56 ?	S. O.	100 à 140	31 à 71	24	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
EPR EPB	36	34 à 38	32	30 à 34	105	36	12	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 48 cm
PEG	38	10 à 42	34	10 à 38	75 ou 55 ^a	6 ou -14	10 ou aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 42 cm
PET	30	10 à 32	26	10 à 28	75 ou 55 ^a	6 ou -14	10 ou aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 34 cm
CET	> 28 ?	> 28 ?	30 ?	S. O.	70	1	24	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Note : estimation peu précise (\$/m ³ et matrice)
SAB	24	22 à 24	14 à 18	S. O.	60 à 70	-9 à 1	14	À cause de la TBE, selon l'objectif minimal \$/m ³	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
BOP	30	10 à 32	34	S. O.	50	-19	34	Seuil minimal de 34 cm pour une VF _{bo} d'au moins 60 \$/m ³	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 36 cm
TIL	>48 ?	48 à ?	46 ?	44 à ?	45	-24	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Note : estimation peu précise (\$/m ³ et matrice)
PRU	52	50 à 56	48	46 à 52	30	-39	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Note : estimation peu précise (\$/m ³ et matrice)
THO	38	36 à 40	34	32 à 36	70	1	18	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Note : estimation peu précise (\$/m ³ et matrice)

^a : La VF_{tot} estimée des peupliers pour la production de panneaux OSB est de 75 \$/m³. Toutefois, cette valeur était mise en doute et nous avons donc effectué une analyse de sensibilité avec une VF_{tot} de 55 \$/m³, laquelle a permis de constater que le seuil de DMF ne changeait pas.

^b : Les valeurs avec un point d'interrogation indiquent les cas où il n'a pas été possible d'identifier le DMF, car il serait situé à un diamètre supérieur à l'intervalle d'interprétation du modèle.

S. O. = sans objet

Tableau 10 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et de l'érable rouge dans les régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité

Ess. et classes	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VFtot (\$/m³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VFtot = 60 \$/m³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
Érable à sucre									
CR	54	54 à 56	50	50 à 52	80-90	11 à 21	32 à 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 60 cm
CR-AB	50	48 à 52	46	44 à 48	80-85	11 à 16	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 56 cm
CR-C	> 54 ?	S. O.	> 56 ?	S. O.	70-80	1 à 11	30 à 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
M	30	24 à 34	26	24 à 30	55-60	-14 à -9	32 à 36*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
M-AB	34	34 à 36	34	S. O.	65-70	-4 à 1	34	Min. 34 cm pour la classe B	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 42 cm
M-C	24	24 à 36	24	24 à 32	55-60	-14 à -9	30 à 34*	Min. 24 cm pour la classe C	Modéré : perte < 2 %/an, jusqu'à 46 cm
S	44	40 à 46	40	36 à 42	60-65	-9 à -4	32 à 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte < 2 %/an jusqu'à 60 cm
S-AB	38	34 à 46	34	34 à 42	65-70	-4 à 1	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 46 cm
S-C	48	24 à 50	44	24 à 46	65-70	-4 à 1	30 à 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : le %/an diminue modérément avec le DHP
Érable rouge ≤ 46,25°N									
Toutes	40	38 à 40	36	34 à 36	50	-19	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte > 1 %/an
Érable rouge > 46,25°N									
Toutes	36	34 à 36	32	30 à 32	50	-19	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte > 1 %/an

* Valeurs différentes selon la région écologique.

Tableau 11 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre du bouleau jaune dans les régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité

Ess. et classes	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VFtot (\$/m³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VFtot = 60 \$/m³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
Bouleau jaune									
CR	52	50 à 54	48	46 à 50	80-105	11 à 36	30 ou 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 60 cm
CR-AB	48	38 à ?	44	34 à 52	80-110	11 à 41	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an
CR-C	>50 ?	S. O.	52 ?	S. O.	65-75	-4 à 6	30 ou 40*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
M	30	24 à 36	26	24 à 32	55	-14	30 ou 40*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
M-AB	34	34 à 38	34	S. O.	65-90	-4 à 21	34	Min. 34 cm pour la classe B	Fort : perte > 2 %/an
M-C	24	24 à 48	24	24 à 44	55	-14	30 ou 40*	Min. 24 cm pour la classe C	Fort : perte > 1 %/an, sauf 36-46 cm
S	54	42 à ?	50	38 à 60?	70-80	1 à 11	30 ou 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 60 cm
S-AB	34	34 à 44	34	34 à 40	65-90	-4 à 21	34	Min. 34 cm pour la classe B	Modéré : environ 1 %/an
S-C	>50 ?	S. O.	54 ?	S. O.	65-75	-4 à 6	30 ou 40*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	

* Valeurs différentes selon la région écologique.

Tableau 12 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et de l'érable rouge dans les régions écologiques 4a, 4b, 4c, et 4d, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité

Ess. et classes	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VFtot (\$/m³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VFtot = 60 \$/m³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
Érable à sucre									
CR	46	44 à 48	42	40 à 44	60-70	-9 à 1	36 à 44*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : le %/an diminue modérément avec le DHP
CR-AB	>46	36 à ?	44?	34 à ?	60-70	-9 à 1	34		
CR-C	>44 ?	S. O.	44 ?	S. O.	60-65	-9 à -4	40 à 44*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
M	30	24 à 34	26	24 à 30	55	-14	46 ou impossible*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
M-AB	34	34 à 36	34	S. O.	60-65	-9 à -4	34	Min. 34 cm pour la classe B	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 42 cm
M-C	24	24 à 36	24	24 à 32	55	-14	40 à 44*	Min. 24 cm pour la classe C	Modéré : perte < 2 %/an jusqu'à 46 cm
S	44	40 à 46	40	36 à 42	55-60	-14 à -9	42 à 48*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte < 2 %/an jusqu'à 60 cm
S-AB	38	34 à 46	34	34 à 42	60-65	-9 à -4	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 46 cm
S-C	48	24 à 50	44	24 à 46	60	-9	40 à 44*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : le %/an diminue modérément avec le DHP
Érable rouge > 46,25 °N									
Toutes	36	34 à 36	32	30 à 32	50	-19	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte > 1 %/an

* Valeurs différentes selon la région écologique.

Tableau 13 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre du bouleau jaune dans les régions écologiques 4a, 4b, 4c, 4d, 5a, 5b et 5e, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité

Ess. et classes	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VFtot (\$/m³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VFtot = 60 \$/m³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
Bouleau jaune									
CR	56	54 à 58	52	50 à 54	65-95	-4 à 26	32 ou 34*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
CR-AB	56	46 à ?	52	42 à 56?	80-95	11 à 26	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
CR-C	> 50 ?	S. O.	52 ?	S. O.	65-75	-4 à 6	30 ou 42*		
M	30	24 à 36	26	24 à 32	55	-14	34 ou 42*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
M-AB	34	34 à 38	34	S. O.	65-75	-4 à 6	34	Min. 34 cm pour la classe B	Fort : perte > 2 %/an
M-C	24	24 à 48	24	24 à 44	55	-14	30 ou 42*	Min. 24 cm pour la classe C	Fort : perte > 1 %/an, sauf 36-46 cm
S	54	42 à ?	50	38 à 60?	55-70	-14 à 1	34 ou 46*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : perte < 1 %/an jusqu'à 60 cm
S-AB	34	34 à 44	34	34 à 40	65-75	-4 à 6	34	Min. 34 cm pour la classe B	Modéré : perte environ 1 %/an
S-C	>50 ?	S. O.	54 ?	S. O.	65-75	-4 à 6	30 ou 42*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	

* Valeurs différentes selon la région écologique.

Tableau 14 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de l'érable à sucre et de l'érable rouge dans les régions écologiques 1a, 2b, 3d, 4f, 4g, 4h 5f, 5g, 5h et 5i, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité

Ess. et classes	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VFtot (\$/m³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VFtot = 60 \$/m³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
Érable à sucre									
CR	>54 ?	NA	56 ?	NA	75-85	6 à 16	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
CR-AB	>52 ?	S. O.	56 ?	S. O.	85-90	16 à 21	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
CR-C	46	46 à ?	42	42 à ?	65-70	-4 à 1	30 à 40*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré (< -2 %/an) jusqu'à 46 cm
M	30	24 à 34	26	24 à 30	55-60	-14 à -9	34 à 42*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
M-AB	34	34 à 36	34	S. O.	60-70	-9 à 1	34	Min. 34 cm pour la classe B	Faible : < 1 %/an jusqu'à 42 cm
M-C	24	24 à 36	24	24 à 32	55	-14	30 à 40*	Min. 24 cm pour la classe C	Modéré (< 2 %/an) jusqu'à 46 cm
S	44	40 à 46	40	36 à 42	60-65	-9 à -4	32 à 38*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte < 2 %/an jusqu'à 60 cm
S-AB	38	34 à 46	34	34 à 42	60-70	-9 à 1	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : < 1 %/an jusqu'à 46 cm
S-C	48	24 à 50	44	24 à 46	65-70	-4 à 1	30 à 40*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : le %/an diminue modérément avec le DHP
Érable rouge ≤ 46,25 °N									
Toutes	40	38 à 40	36	34 à 36	50	-19	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte > 1 %/an
Érable rouge > 46,25 °N									
Toutes	36	34 à 36	32	30 à 32	50	-19	Aucun	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte > 1 %/an

* Valeurs différentes selon la région écologique.

Tableau 15 Diamètres à maturité financière (DMF moyen et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre du bouleau jaune dans les régions écologiques 1a, 2b, 3d, 4f, 4g, 4h 5f, 5g, 5h et 5i, calculés sur 11 ans et projetés sur 30 ans, ainsi que la valeur financière des arbres à 30 ans, selon la classe d'arbre avec ou sans la classe de qualité

Ess. et classes	Observé 11 ans		Projection 30 ans		VFtot (\$/m³) près du DMF ₃₀		DHP min. pour VFtot = 60 \$/m³	Notes pour justifier le DMF ₃₀	Notes sur le risque de perte de valeur au DMF ₁₁
	DMF ₁₁	Intervalle à 95 %	DMF ₃₀	Intervalle à 95 %	Brut	Net			
Bouleau jaune									
CR	46	44 à ?	42	40 à 44	65	-4	38	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Modéré : perte < 2 %/an
CR-AB	>44 ?	34 à ?	44 ?	34 à ?	70-115	1 à 46	34	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
CR-C	>38 ?	S. O.	?	S. O.	65-75	-4 à 6	30 à 46*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	
M	30	24 à 36	26	24 à 32	55	-14	44	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Fort : le %/an diminue rapidement avec le DHP
M-AB	34	34 à 38	34	S. O.	60-90	-9 à 21	34	Min. 34 cm pour la classe B	Fort : > 2 %/an
M-C	24	24 à 48	24	24 à 44	55	-14	30 à 46*	Min. 24 cm pour la classe C	Fort (> 1 %/an), sauf 36-46 cm
S	54	42 à ?	50	38 à 60?	70	2	38	DMF ₁₁ , moins 4 cm	Faible : < 1 %/an jusqu'à 60 cm
S-AB	34	34 à 44	34	34 à 40	60-90	-9 à 21	34	Min. 34 cm pour la classe B	Modéré : environ 1 %/an
S-C	>50 ?	S. O.	54 ?	S. O.	65-75	-4 à 6	30 à 46*	DMF ₁₁ , moins 4 cm	

* Valeurs différentes selon la région écologique.

Discussion et conclusion

Les résultats des travaux sur les diamètres à maturité financière mettent en lumière les observations suivantes que nous considérons comme fondamentales et utiles à l'élaboration d'une prescription sylvicole et de ses directives :

1. Bien que l'on puisse rencontrer en forêt quelques arbres de très gros DHP (p. ex. DHP > 60 cm pour les feuillus les plus recherchés) et de belle qualité apparente, il n'est pas toujours productif de laisser croître les plus beaux arbres jusqu'à de tels DHP, car leur risque de se dégrader ou de mourir est trop grand, d'où la notion de DMF.
2. Beaucoup d'arbres dans les forêts du domaine de l'État situées en zone tempérée nordique ont une VF_{tot} inférieure au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle de l'enquête de 2019 (Groupe DDM, 2021), même lorsqu'il y a un marché favorable pour la pâte de feuillus durs.

Ces arbres sont concentrés parmi certaines essences compagnes, comme le tilleul et la pruche, mais se trouvent aussi parmi les arbres d'un DHP inférieur à 30 ou 34 cm et parfois même jusqu'à 40 ou 42 cm pour des essences de meilleure valeur (p. ex. ERS, BOJ, BOP, CHR, etc.).

Dans ces cas, pour favoriser la rentabilité financière de l'industrie, il pourrait être possible d'augmenter le DHP minimal de récolte de ces arbres au diamètre requis afin d'obtenir une VF_{tot} d'au moins 60 \$/m³. Par exemple, bien que le DMF₃₀ du BOJ de priorité M et de qualité C soit de 24 cm (tableau 14), il serait possible de ne pas le placer en haute priorité de récolte si son DHP est inférieur à 30 cm dans les régions écologiques 3c, 3d et 4c, si l'objectif est de récolter principalement des arbres ayant une VF_{tot} d'au moins 60 \$/m³. Le seuil de DHP correspondant dans les régions écologiques 3a, 3b et 4b serait de 40 cm étant donné la VF_{tot} moindre du bouleau jaune dans ces régions situées plus à l'ouest.

3. Le PIB, le CHR et les épinettes ont généralement la plus grande VF_{tot} par unité de volume.

Les DMF₃₀ du PIB et du CHR sont très élevés, soit possiblement à 56 cm ou plus. Cependant, l'analyse ne prend pas en compte certains risques liés à de nouveaux ravageurs, comme le flétrissement du chêne (*Bretziella fagacearum*) ou le longicorne brun de l'épinette (*Tetropium fuscum*), qui sont susceptibles d'arriver au Québec au cours des prochaines décennies.

4. Nous n'avons pas analysé spécifiquement l'évolution de l'ERS et du BOJ n'ayant pas de potentiel de bille de bois d'œuvre sur la première section de 5 m du tronc (qualité D).
 - i. Ces arbres ont une distribution d'environ 63 % de classe M, 20 % de classe S et 17 % pour le groupe de classes CR. Les arbres de qualité D ont une VF_{bo} déjà faible. Ainsi, même s'il est très risqué de perdre ces arbres par mortalité au cours de la prochaine rotation, la diminution de leur EVF_{bo} serait faible.
 - ii. Lorsqu'un arbre de classe de qualité D est révisé à la hausse (p. ex. classe C) au cours d'une période de croissance, alors il affichera un grand gain de son EVF_{bo}. Par exemple, la VF_{tot} d'un ERS de 30 cm de qualité D peut passer de 14,21 \$ à 29,48 \$ s'il devient de qualité C à 32 cm, soit un gain de 107 % principalement attribuable au gain de VF_{bo}. Par conséquent, la modélisation financière de ces arbres (données non présentées) parviendrait à la conclusion qu'il vaudrait mieux prendre le risque de les laisser croître.

- iii. Nous relevons ici l'importance de considérer l'échelle spatiale d'analyse. En effet, à l'échelle d'un peuplement écoforestier, il ne serait pas financièrement avantageux de promouvoir le développement d'une composition ayant une forte proportion d'arbres de qualité D, car un tel peuplement serait faible en VFbo et d'intérêt pour la transformation. Cependant, il faut retenir que conserver quelques arbres à l'hectare de classe M et de qualité D ne représente pas un réel risque financier, puis ils remplissent d'autres fonctions dans l'écosystème.

Recommandations

Nous formulons les recommandations suivantes :

- a) Former un comité chargé de proposer des orientations pour intégrer les connaissances sur la valeur unitaire nette (\$/m³) des arbres et sur les DMF dans le contexte d'aménagement et de planification régionale (tactique et opérationnelle), tout en tenant compte des autres connaissances disponibles, des objectifs et des contraintes d'aménagement.
- b) À long terme, faire un suivi de la disponibilité de nouvelles données permettant éventuellement de réviser les calculs sur les DMF. Cela peut représenter une révision tous les 10 ans.

5. Rendement et production dans les érablières nordiques -Sapinière à bouleau jaune de l'ouest (régions écologiques 4b et 4c)

Mandat

Poursuivre les travaux sur les érablières situées dans les domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest (régions écologiques 4b et 4c), situées sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent et identifiées par la suite sous le nom d'« érablières nordiques ». Les quatre thématiques suivantes ont été retenues :

1. Mise à jour du diamètre à maturité financière (DMF) de l'érable à sucre (ERS)
2. Amélioration de la matrice de répartition par produits pour l'ERS
3. Évaluation comparative du rendement des érablières nordiques
4. Analyse de la variation de la coloration de cœur de l'ERS

1. Mise à jour du diamètre à maturité financière de l'érable à sucre

Prémisse

Des données préliminaires indiquaient que l'ERS se développant dans les érablières nordiques contenait nettement moins de bois d'œuvre comparativement à la moyenne provinciale. Cela pourrait avoir un effet à la baisse sur le DMF calculé lors des travaux du CIMOTFF en 2014.

Méthodologie

Plus de 475 arbres-échantillons supplémentaires d'ERS, situés dans des érablières nordiques, ont été mesurés et classés (Petro et Calvert, 1976) dans le cadre de la mise à jour des matrices de répartition par produits (Havreljuk et autres [En prép.]). Ces données ont permis d'étalonner un modèle des volumes par produits pour l'ERS qui varie selon la région écologique. Uniquement les régions écologiques 4b et 4c, du domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest, sont intégrées à ce modèle. Ce nouveau modèle a été utilisé par le groupe sur la révision des DMF (voir le chapitre 4). De plus, une grande partie des billes de qualité sciage extraites des 475 arbres-échantillons supplémentaires ont été sciées et classées (National Hardwood Lumber Association, 2007) de manière à obtenir une meilleure évaluation de la valeur des arbres établie à partir des planches. Ces données ont également été utilisées pour bonifier l'analyse des DMF dans les régions écologiques 4b et 4c (Guillemette et Havreljuk, sous presse).

Résultats

Pour les érablières nordiques, le DMF qui avait été évalué à 48 cm pour les ERS vigoureux ayant un potentiel de bois d'œuvre, dans les travaux du CIMOTFF en 2014, a été abaissé à 44 cm pour les arbres de qualité C et à 34 cm pour ceux de qualité A ou B. La valeur monétaire des érables dans cette zone a été calculée à 60 et 65 \$/m³ respectivement pour les tiges de qualité B (DHP de 34 cm) et de qualité C (DHP de 44 cm). À titre comparatif, le coût moyen d'approvisionnement d'un scieur de feuillus a été

évalué à 69 \$/m³ lors de l'*Enquête sur les coûts d'opération forestière dans les forêts du domaine de l'État ainsi que sur les coûts et revenus de l'industrie du sciage du Québec* (Groupe DDM, 2020).

2. Amélioration de la matrice de répartition par produits pour l'ERS

Les travaux et les résultats obtenus ont été intégrés à ceux du groupe sur la matrice de répartition par produits (voir le chapitre 3).

Afin de permettre une amélioration de la matrice de RPP, six nouveaux secteurs d'échantillonnage répartis du Témiscamingue à la Mauricie ont été ajoutés (Havreljuk et autres [En prép.]).

De manière générale, les résultats montrent que le volume de bois d'œuvre dans les ERS situés dans les régions écologiques 4b et 4c était nettement inférieur aux moyennes observées dans les régions écologiques situées plus au sud (Tableau 16).

Tableau 16 Proportion du volume marchand net dans les érables à sucre selon les grades de billes de bois d'œuvre de grande valeur (F1F2) ou de grade minimal pour le sciage conventionnel (F3), par classe de qualité de l'arbre sur pied, par classe de DHP et par région écologique selon les nouveaux modèles de répartition par produits

Classe de qualité	Classe de DHP (cm)	Région écologique	Volume F1F2 (%)	Volume F3 (%)	Volume F1F2F3 (%)
AB	34 à 38	3a	18,9	22,7	41,6
		3b	15,0	24,4	39,4
		4b	2,2	20,2	22,5
		4c	5,7	18,2	23,9
	40 à 48	3a	32,9	17,6	50,6
		3b	23,7	19,4	43,2
		4b	5,2	15,5	20,7
		4c	11,0	13,9	24,9
C	34 à 38	3a	7,4	19,2	26,6
		3b	5,8	21,5	27,3
		4b	0,6	16,6	17,2
		4c	1,7	15,0	16,7
	40 à 48	3a	14,3	17,1	31,4
		3b	10,9	19,3	30,1
		4b	1,5	14,7	16,2
		4c	3,7	13,2	17,0

3. Évaluation comparative du rendement des érablières nordiques

Prémisse

L'accroissement annuel net en surface terrière des érablières nordiques se situe dans la moyenne provinciale (environ $0,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$; Guillemette et autres, 2013). Cependant, le rendement en bois d'œuvre de l'ERS devrait être beaucoup plus faible à cause de sa plus faible qualité externe et interne près de la limite nord de son aire de distribution.

Méthodologie

Nous avons comparé les rendements en surface terrière et en volume des érablières nordiques (régions écologiques 4b et 4c) avec ceux des érablières situées plus au sud. Les rendements proviennent des résultats mesurés 20 ans après une coupe de jardinage pratiquée dans un contexte opérationnel de 1995 à 1999 (Guillemette et autres [En prép.]). Notons que nous avons utilisé les volumes par produits récemment mis à jour (Havreljuk et autres [En prép.]) et qui s'ajustent à différentes réalités régionales.

Résultats

Le Tableau 17 présente une comparaison entre le rendement des érablières nordiques² et celui des érablières situées plus au sud dans les domaines de l'érable à tilleul de l'ouest ou à bouleau jaune³ pour des territoires ayant un historique de perturbation et des structures de peuplement similaires. La portion de la région écologique 3a qui a été affectée par un chablis important survenu en juillet 2006 a été exclue.

Même si les rendements des deux regroupements de régions écologiques exprimés en surface terrière ou en volume marchand brut sont semblables, celui exprimé en bois d'œuvre de grande valeur (DF1F2⁴) d'ERS, de BOJ, de BOP et de CHR tend à être plus faible (55 à 62 %) dans les érablières nordiques comparativement aux érablières plus au sud. De plus, les érablières nordiques ne contiennent en moyenne que de 35 à 50 % du volume DF1F2 et de 47 à 65 % du volume total de bois d'œuvre (DF1F2F3) retrouvé dans les érablières plus méridionales.

² Végétation potentielle FE3 dans les régions écologiques 4b et 4c.

³ Végétation potentielle FE3 dans les régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c.

⁴ DF1F2 = billes de déroulage (D) et de sciage de grade F1 ou F2, soit les deux meilleurs grades de sciage conventionnel, le plus bas grade de sciage conventionnel étant le F3.

Tableau 17 États initiaux et rendements observés des érablières nordiques (régions écologiques 4b et 4c) et des autres érablières situées au nord du fleuve Saint-Laurent (régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c).

Variable	Érablières nordiques	Autres érablières
Variable d'état initial		
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	25	28 à 31
Volume marchand brut (m ³ ·ha ⁻¹)	195	225 à 285
Volume DF1F2 (m ³ ·ha ⁻¹)	9	18 à 26
Volume DF1F2F3 (m ³ ·ha ⁻¹)	28	43 à 59
Variable de rendement		
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	0,32	0,23 à 0,27
Volume marchand brut (m ³ ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	2,4	1,9 à 2,5
Volume DF1F2 (m ³ ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	0,16	0,26 à 0,29
Volume DF1F2F3 (m ³ ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	0,48	0,50 à 0,62

Source : Guillemette et autres, en prép.

4. Analyser la variation de la coloration de cœur de l'ERS

Prémisse

Les praticiens observent des variations dans la proportion de la coloration du cœur de l'ERS selon les secteurs et notent qu'elle pourrait être plus grande vers le nord de son aire de distribution. Toutefois, cela n'est pas démontré dans la littérature scientifique.

Méthodologie

Dans le cadre des travaux de maîtrise de monsieur David Voyer (Voyer et autres [En prép.]), des arbres-échantillons d'ERS ont été sondés, en 2019 et 2020, pour établir, entre autres, la proportion de coloration sur 16 sites. Ceux-ci sont principalement situés dans les portions nord du domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest (9 sites) et du domaine de l'érablière à bouleau jaune (7 sites) (Figure 11).

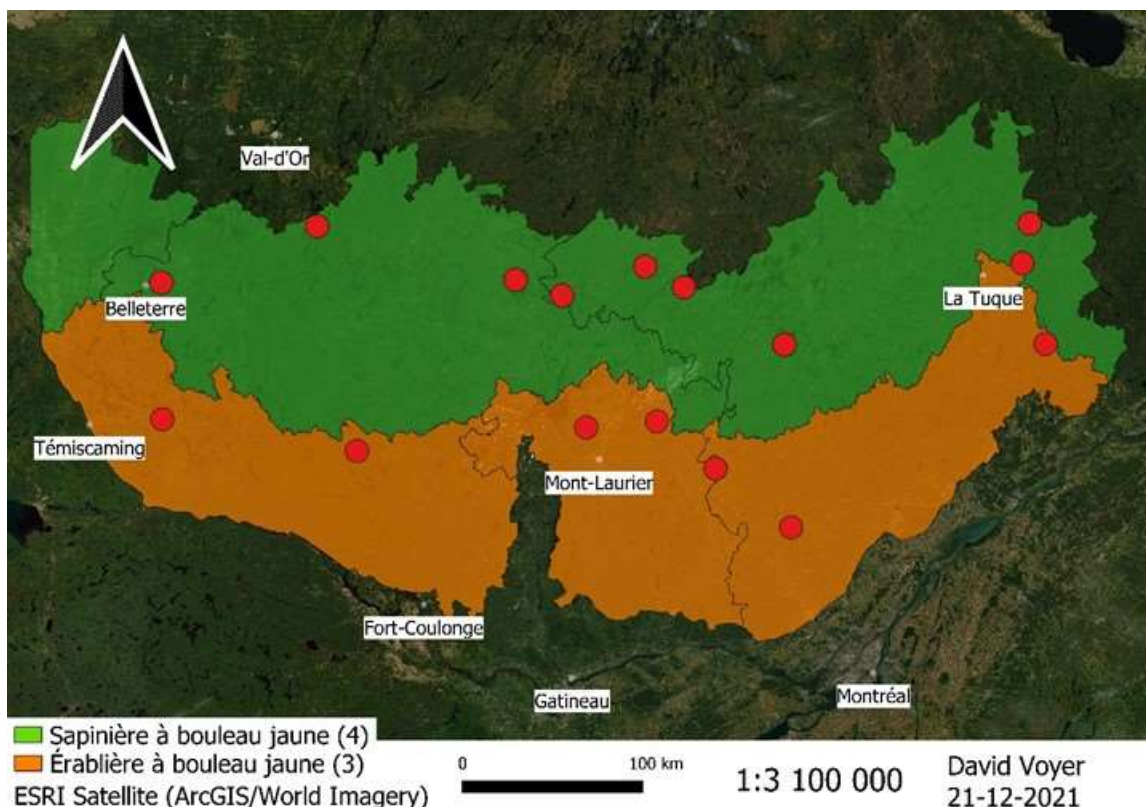


Figure 11 Localisation des sites de l'étude de Voyer et autres (en prép.), par domaine bioclimatique (couleurs) et région écologique (codes en noir et délimitations par des lignes grises)

Afin de limiter l'effet de l'historique de perturbations, un des critères de sélection de ces sites était l'absence d'une perturbation ou la présence d'une perturbation mineure.

Une autre analyse de la coloration et de la carie a été effectuée avec la base de données des études de tronçonnage effectuées au MFFP. L'objectif était d'étudier, à l'échelle provinciale, des différences de coloration, de minéralisation et de produits extraits des ERS ayant un potentiel de bois d'œuvre (Guillemette et autres, 2021).

Résultats

Il n'y avait pas de différence significative entre les défauts internes (coloration et carie) des ERS situés dans les 16 sites des deux domaines bioclimatiques à l'étude, sauf pour la classe de DHP de 30 à 38 cm. Dans cette classe, on a noté une augmentation d'environ 10 % de la proportion de carie dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest (60 %) comparativement à l'érablière à bouleau jaune (50 %).

Un résultat surprenant a été obtenu dans l'analyse des âges des arbres étudiés. Les plus petits arbres de la classe de DHP de 10 à 18 cm avaient en moyenne entre 60 et 100 ans selon les sites. Cela démontre une croissance relativement lente des ERS dans les peuplements non aménagés de ces territoires. De plus, ces petits arbres étaient déjà affectés à près de 45 % par des défauts internes (coloration et carie).

Notons aussi que les travaux de Voyer et autres ont montré que la proportion des ERS de priorité de récolte (vigueur) C ou R diminuait rapidement avec l'augmentation du DHP dans les peuplements non traités ou perturbés situés dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest. En effet, dans les classes de DHP supérieures à 38 cm, la proportion des C ou R était seulement de 25 % pour les érablières nordiques comparativement à une proportion de 50 % dans les données tirées du domaine de l'érablière à bouleau jaune.

L'analyse de la base de données des études de tronçonnage et des arbres ayant un potentiel de bois d'œuvre (qualités A, B ou C), couvrant des sites situés plus au sud, a, quant à elle, montré un écart d'environ 15 % de la proportion de la coloration de cœur entre les cinq sites situés au nord de Mont-Laurier (55 à 60 %) et les deux sites situés dans le sud de la région écologique 3b (40 à 45 %) (Guillemette et autres, 2021).

Discussion et conclusion

L'ensemble des éléments à l'étude appuie l'idée que l'ERS dans les régions écologiques 4b et 4c (érablières nordiques) est de plus faible qualité que dans les domaines de l'érablière à tilleul de l'ouest (2a) et de l'érablière à bouleau jaune (3a, 3b et 3c), situés au sud.

D'autres travaux ont montré que la présence d'ERS sur pied de meilleure qualité (groupe de qualité AB) déclinait de façon importante vers le nord. Cela est associé à une diminution de la température annuelle (Guillemette et Bédard, 2019).

De plus, à partir des données des secteurs d'intervention planifiés en Outaouais de 2011 à 2018, nous avons observé que la proportion d'arbres des classes C ou R était de 34 % pour les ERS situés dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune, comparativement à 46 % pour ceux situés au sud.

Comparativement aux peuplements situés plus au sud, quant à l'importance de la coloration dans le nord, d'autres données (non publiées) tirées du mesurage des bois abattus sur les terres publiques semblent indiquer que l'ampleur de la coloration ne serait pas seulement associée à la nordicité de ces territoires mais, de façon plus générale, à de moins bonnes conditions de croissance. Bien que l'échantillonnage comporte le biais d'être limité à des arbres ciblés pour la récolte (DHP supérieur au DMF ou arbres de priorité de récolte MS-O), il indique que, dans certains secteurs du sud des Laurentides et de l'Outaouais, la coloration peut aussi être importante.

D'ailleurs, les travaux de Germain et autres (2015) dans l'État de New York ont démontré que la coloration était plus importante lorsque les arbres poussent sur un sol plus acide comme ceux qu'on trouve fréquemment dans les érablières situées sur les terres publiques des régions écologiques à l'étude, soit des tills d'origine granitique ou de gneiss. De plus, selon Leak et autres (2014), les meilleurs sites pour produire de l'ERS sont des tills formés à partir d'une roche calcaire, suivis des autres tills situés en bas de pente (enrichissement par drainage latéral).

Ainsi, les érablières situées sur des tills d'origine granitique ou de gneiss en haut de pentes ou sur des sommets seraient un peu moins propices à la production de l'érable à sucre et plus propices au développement de la coloration de cœur. Or, de telles érablières sont fréquentes dans les territoires à l'étude, particulièrement dans la portion plus nordique où les érablières se retrouvent souvent du milieu

des pentes jusqu'aux sommets, le bouleau jaune et les conifères étant plus abondants au bas des pentes. Cependant, il serait possible d'y trouver des secteurs un peu plus riches où la coloration pourrait être moins importante que la tendance générale.

Maintenant que nous connaissons un peu mieux la qualité des ERS dans les érablières nordiques, nous nous questionnons en vue de déterminer quelles sont les meilleures orientations d'aménagements possibles du territoire, sachant que l'essence à promouvoir dans plusieurs des peuplements est, malgré tout, l'ERS. Une des pistes de solution serait de promouvoir la croissance des plus petits arbres vigoureux de manière à éventuellement récolter, pour un même DHP, des arbres plus jeunes. Cette recommandation se fonde sur les hypothèses suivantes, lesquelles restent à être validées :

- I. Le taux interne de coloration est négativement corrélé au taux d'accroissement (Havreljuk, Achim et Pothier, 2013). Par conséquent, pour un même DHP, un arbre plus jeune aurait une moindre proportion de coloration dans la bille de bois d'œuvre.
- II. Un taux d'accroissement élevé favorise le développement d'arbres de meilleure qualité (groupe de qualité AB).

Les changements climatiques pourraient améliorer les conditions de croissance de l'érable à sucre dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest. Entre autres, ils pourraient permettre à l'ERS de coloniser davantage les milieux et bas de pente dans ce territoire, soit des conditions de terrain peut-être plus favorables à la formation d'une coloration du cœur de moindre ampleur. De plus, si les épisodes de froids extrêmes devenaient moins fréquents en hiver, il pourrait y avoir moins d'arbres affectés par des défauts externes, comme les gélivures, par exemple.

Recommandations

Nous formulons les recommandations suivantes :

- a) Prendre en considération la faible valeur de l'érable à sucre actuellement sur pied dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c, dans le choix des scénarios et des investissements sylvicoles planifiés.
- b) Intégrer la matrice régionalisée de répartition par produits de l'ERS pour les régions écologiques 4b et 4c dans les différents outils (MERIS, DICA, etc.) et processus utilisés dans l'organisation (MFFP).
- c) Intégrer les recommandations suivantes dans les orientations d'aménagement et de sylviculture dans les érablières nordiques, régions écologiques 4b et 4c, afin de produire et de récolter des érables à sucre de meilleure qualité :
 - i. Ajuster le DMF de l'érable à sucre dans l'intervalle de 34 à 44 cm (résultats de cette section et Tableau 12) dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c, selon les indicateurs forestiers (voir Saucier et autres, 2021), tout en prenant aussi soin de conserver suffisamment de semenciers de cette essence.
 - ii. Réaliser les scénarios sylvicoles au moment approprié dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c afin de favoriser la production d'arbres plus jeunes.
 - iii. Évaluer le potentiel de croissance du site afin de considérer le niveau de production attendu dans la détermination du scénario sylvicole retenu.

À moyen et long terme :

- d) Poursuivre les travaux afin de revoir les stratégies d'aménagement dans les érablières nordiques afin d'améliorer la qualité des érables produits et récoltés.
 - i. Identifier des scénarios sylvicoles économiquement viables qui permettent la mise en valeur de ces érablières. Par exemple, en favorisant l'installation d'une nouvelle régénération et en éduquant les perches vigoureuses d'ERS, on pourrait sensiblement améliorer la qualité des érables à sucre qui pourront être récoltés lors des prochaines interventions.
 - ii. Évaluer l'effet de ces nouvelles stratégies en érablières nordiques sur la croissance et la production de bois d'œuvre afin d'évaluer l'impact de ces modifications sur la possibilité forestière.
- e) Comprendre le développement et les facteurs expliquant la coloration de cœur de l'érable à sucre.

6. Objectifs de base de la sélection des arbres lors de la récolte des peuplements feuillus ou mixtes à dominance de feuillus

Mandat

Proposer l'utilisation d'une méthode de travail pour faciliter la compréhension des objectifs à la source des directives de prélèvement dans les procédés de régénération et améliorer l'uniformité des directives de prélèvement pour des conditions semblables de peuplement et d'objectifs du plan d'aménagement forestier intégré tactique (PAFIT).

Prémisse

La formulation d'une directive de prélèvement constitue l'une des actions les plus concrètes dans la préparation d'une prescription d'un procédé de régénération. Celle-ci est encadrée par le PAFIT de l'unité d'aménagement concernée, lequel plan est fondé sur les articles de la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (A-18.1). Ce plan contient notamment les orientations et les objectifs d'aménagement ainsi que les stratégies sylvicoles à déployer. Bien qu'il énonce les options de traitement sylvicole ou de scénario sylvicole à appliquer selon les objectifs, le PAFIT est élaboré à l'échelle de l'aménagement forestier et ne s'avance donc pas dans les détails des modalités à mettre en œuvre dans chacun des traitements sylvicoles pour atteindre ces objectifs.

Pour traduire l'ensemble des objectifs à atteindre dans chaque peuplement ou groupe de peuplements, le sylviculteur ou la sylvicultrice élabore une directive de prélèvement qui s'appuie sur les principes de base de l'écologie forestière et de la sylviculture (Guides sylvicoles du Québec, MRN, 2013ab). Les directives de récolte ou de martelage sont aussi influencées par différents enjeux et problématiques locaux ou régionaux. Or, cette situation engendre des différences dans la mise en œuvre des prescriptions sylvicoles pour des conditions forestières semblables. Ces différences soulèvent parfois de nombreux questionnements de la part des divers intervenants concernés par cette mise en œuvre.

À la base de cette problématique se trouve un défi : les arbres que l'on souhaite maintenir sur pied pour atteindre plusieurs objectifs du PAFIT sont généralement ceux ayant le plus de valeur financière en bois d'œuvre (VFbo). À l'inverse, les arbres dont on souhaite prioriser la récolte sont généralement ceux ayant une plus forte proportion de bois de trituration. Ainsi, selon l'ampleur de la demande pour le bois de trituration, la réalisation d'une directive de récolte exigera un niveau variable de compromis dans ce sens. Autrement, le traitement ne sera pas exécuté et les objectifs de production de biens et services ne seront pas atteints.

Dans un contexte d'aménagement forestier durable, les principaux principes de base orientant les prélèvements en forêt feuillue et mixte à dominance feuillue devraient répondre aux objectifs suivants :

- ✓ Maintenir ou améliorer la composition des peuplements en essences désirées, plus particulièrement en essences à promouvoir.
- ✓ Maintenir ou améliorer le capital forestier en croissance (CFC) en essences désirées.

L'atteinte de ces objectifs devrait être possible en précisant les éléments suivants :

- a) Les critères menant aux choix d'arbres à abattre et à conserver sur pied, au sein d'une même essence. Cela permettrait d'obtenir des peuplements ayant des conditions acceptables de croissance, de santé et de qualité.
- b) Les critères de sélection des semenciers, leur nombre minimal à l'hectare ainsi que l'espacement minimal à conserver entre ceux-ci. Cela permettrait l'établissement d'une régénération naturelle en quantité et de qualité acceptable.

Méthodologie

La méthode de travail proposée consiste à se doter de tableaux de bord régionaux composés d'indicateurs clés pour vérifier l'atteinte des divers objectifs mentionnés dans le PAFIT (Tableau 18).

Le choix des indicateurs à utiliser découle à la fois des objectifs du PAFIT et de l'abondance des essences visées dans le peuplement. En effet, celles-ci doivent être suffisamment abondantes et relativement bien réparties entre les placettes afin d'obtenir une précision minimalement acceptable pour en juger l'indicateur.

Tableau 18 Application des indicateurs selon le procédé de régénération.

Indicateurs/Traitements	CJ	CPI-CP	CPI-RL	CPR	CRS
		ensem.	ensem.	ensem.	
Changement(s) de composition du couvert	x	x	x		
Densité des semenciers			x	x	x
Surface terrière résiduelle	x	x	x	x	
Changement de proportion du CFC induit par la récolte	x	x	x		
Prélèvement en surface terrière (ou en proportion)	x	x	x		
Proportion de la surface terrière en arbres à risque élevé de mortalité	x	x	x		
Quantité de bois (surface terrière ou volume) des arbres récoltés et résiduels	x	x	x		
Croissance anticipée des arbres résiduels	x	x	x		

Résultats

Nous avons relevé les principaux objectifs poursuivis par les gestionnaires du territoire forestier qui pouvaient être inclus dans les prescriptions sylvicoles selon trois groupes : des objectifs généraux, des

objectifs spécifiques aux procédés de régénération menant à une structure jardinée ou irrégulière, puis des objectifs spécifiques aux procédés de régénération menant à une structure régulière.

1. Objectifs généraux

Les PAFIT contiennent des objectifs d'aménagement ayant une incidence à l'échelle des peuplements, par exemple augmenter le capital forestier du territoire, ne pas récolter davantage que la production obtenue dans un peuplement au cours de la rotation ou encore restreindre la proportion de superficies en procédés de régénération menant à la futaie régulière.

Les objectifs énoncés dans les PAFIT sont parfois accompagnés de cibles explicites et applicables au niveau de la directive de prélèvement ou de martelage; il suffit de les utiliser.

Par contre, certains objectifs stipulent d'augmenter ou de diminuer un attribut de la forêt, mais sans mentionner l'importance du changement recherché. Dans ce cas, nous proposons d'ajuster l'ampleur du changement recherché selon la capacité à intervenir (marchés, programmes financiers) et l'évolution anticipée de la forêt.

À cet effet, il faudrait mieux documenter comment la composition des peuplements est susceptible d'évoluer de manière à mieux orienter les efforts d'amélioration requis. Par exemple, pour ne pas augmenter la proportion de hêtres dans un peuplement, on doit se demander jusqu'à quel point il est nécessaire d'en diminuer la présence après la coupe.

Les PAFIT peuvent contenir une variété d'autres objectifs, dont certains sont spécifiques à une région. Notons, par exemple, la présence d'objectifs associés au bois mort, au maintien des très gros arbres comme legs biologiques (p. ex. des érables d'un DHP > 65 cm), au maintien du potentiel acéricole ou à la rétention d'essences en raréfaction. Les ingénieurs forestiers peuvent définir des indicateurs appropriés à ceux-ci.

2. Objectifs des procédés de régénération menant à une structure jardinée ou irrégulière

Une série d'indicateurs incontournables concerne le changement de la composition forestière induit lors de la coupe. En effet, les PAFIT contiennent de nombreux objectifs visant à maintenir ou à augmenter la proportion de certaines essences désirées par l'industrie de la transformation, particulièrement pour les essences à promouvoir. La composition d'un peuplement est d'ailleurs l'indicateur le plus simple de l'intérêt potentiel des industriels forestiers pour l'approvisionnement en bois.

Des indicateurs de *changement de la composition du couvert forestier*, à la suite d'une coupe d'un procédé de régénération menant à une structure jardinée ou irrégulière, devraient se trouver dans la démarche de préparation d'une prescription sylvicole.

Notons que l'indicateur de *densité des semenciers* est aussi pertinent pour la coupe progressive irrégulière à régénération lente (CPI-RL) en phase d'ensemencement.

Les PAFIT contiennent des objectifs liés au maintien ou à l'augmentation de la productivité des peuplements, parfois à l'amélioration de la qualité des bois feuillus.

Dans les procédés de régénération menant à une structure jardinée ou irrégulière, la majeure partie de la productivité attendue provient des arbres résiduels plutôt que de la régénération. Les caractéristiques des arbres ou des modalités de traitement sylvicole qui influencent le plus la productivité des peuplements ont été répertoriées. Rappelons cependant que la prise en compte de ces informations se fait dans un cadre global qui intègre simultanément de nombreuses notions sylvicoles, comme la gestion de la composition du couvert et de son degré d'ouverture, ainsi que de la structure du peuplement, par exemple.

Caractéristiques des arbres provoquant des gains en VFbo

Les arbres contribuant le plus à la production de VFbo (voir le chapitre 4) sont principalement ceux qui composent le capital forestier en croissance (CFC) devant :

- Être d'essences à promouvoir (adaptées à la station forestière);
- Détenir une classe C ou R;
- Détenir un potentiel de bois d'œuvre;

et

- Détenir un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) inférieur à leur diamètre à maturité financière (DMF). Notons qu'un DMF a été calculé pour chacune des essences (voir le chapitre 4).

Caractéristiques des arbres provoquant des pertes en VFbo

À l'inverse, les arbres d'essences à promouvoir contribuant le plus à la perte de VFbo à court terme (voir le chapitre 4) sont principalement :

- De classes de priorité de récolte M et parfois S, détenant le meilleur potentiel de bois d'œuvre;
- ou
- De classes de priorité de récolte C ou R, détenant un DHP égal ou supérieur à leur DMF.

De plus, d'autres arbres ayant généralement peu de valeur peuvent contribuer à la diminution de VFbo à long terme du peuplement, car ils occupent un espace de croissance qui n'est pas disponible au profit des arbres composant le CFC. Ce sont :

- les essences à maîtriser⁵;

⁵ Les essences à maîtriser sont habituellement dans le groupe des essences dites « sans preneur », comme l'érable rouge et le hêtre à grandes feuilles. Selon le marché régional, la pruche, le thuya et le tilleul sont fréquemment d'autres essences sans preneur, mais pas nécessairement à maîtriser.

- les arbres présentant un risque élevé de mortalité⁶, soit ceux de priorité M, les plus susceptibles d'être affectés prochainement par une perturbation naturelle (p. ex. tordeuse des bourgeons de l'épinette, maladie corticale du hêtre) et les essences intolérantes à l'ombre dans les peuplements de feuillus tolérants (Guillemette. 2019).

Autres indicateurs d'intérêt

Nous avons aussi ciblé deux autres indicateurs qui influencent la productivité des arbres sur pied (Ministère des Ressources naturelles, 2013b). Ce sont les suivants :

1. Surface terrière résiduelle :

- En abaissant localement (échelle de la placette) la surface terrière résiduelle, on peut augmenter la productivité du peuplement, sauf si la surface terrière résiduelle devient trop basse. Généralement, cela se produit lorsque la surface terrière résiduelle est à moins de 14 m²/ha.
- La productivité du peuplement peut être très bonne avec une surface terrière résiduelle de près de 19 m²/ha lorsque le peuplement contient beaucoup de CFC (voir les érablières du groupe 4fgh dans Guillemette et autres, 2013).
- Une surface terrière résiduelle d'au moins 16 m²/ha est généralement requise pour atteindre l'objectif de maintenir un couvert permanent (Ministère des Ressources naturelles, 2013b).
- Il est préférable de ne pas abaisser la surface terrière résiduelle à moins de 18 m²/ha pour favoriser le développement de perches de qualité (Godman et Books, 1971).

2. Taux de prélèvement :

Un taux de prélèvement supérieur à 35 %, ou 10 m²/ha, augmente localement les risques de pertes par chablis (Ministère des Ressources naturelles, 2013b), particulièrement si de gros arbres sont maintenus sur pied en abondance. Dans cette situation, les récolter de manière abondante n'est pas une solution productive, puisqu'elle risque de détruire des perches vigoureuses lors de la récolte, lesquelles auraient contribué à la productivité du peuplement.

Ainsi, pour les **procédés de régénération menant à la futaie de structure jardinée ou irrégulière**, les indicateurs proposés sont :

- le changement de proportion du CFC induit par la récolte;
- la surface terrière résiduelle;
- le prélèvement en surface terrière (ou en proportion);
- la proportion de la surface terrière en arbres à risque élevé de mortalité.

3. Objectifs des procédés de régénération menant à la futaie de structure régulière

⁶ Rappelons que les essences dites « peu longévives », soit habituellement le sapin baumier, le bouleau à papier et les peupliers, sont dans ce groupe d'arbres à risque élevé de mortalité.

Quant aux prescriptions d'un **procédé de régénération en phase d'ensemencement et menant à une structure régulière**, les indicateurs seront davantage reliés à la création de *conditions favorables à l'installation de la régénération naturelle* des essences à promouvoir selon la station, telles :

- la *densité des semenciers* des essences à promouvoir (voir en annexe) afin d'assurer une bonne disponibilité de semences;

et

- la *surface terrière résiduelle* afin de fournir une appréciation du degré de fermeture du couvert, lequel influence les conditions microclimatiques du sous-bois.

La productivité du peuplement attendue après **un procédé de régénération menant à une structure régulière** provient de l'installation de la nouvelle cohorte de régénération en essences désirées. Les indicateurs de composition du couvert mentionnés précédemment remplissent ce rôle. Elle ne provient pas des arbres du peuplement résiduel qui sont conservés sur pied sur une courte période de 5 à 10 ans pour la CPR, de semenciers dans certaines CRS ou comme élément de rétention. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un indicateur de productivité du couvert forestier dans ce cas.

Discussion et conclusion

Le mandat était de proposer une méthode de travail pour mieux uniformiser et rendre plus compréhensibles les directives de prélèvement des peuplements feuillus et mixtes tempérés. Nous avons concentré nos efforts sur les éléments suivants :

1. Nous proposons d'abord de doter les PAFIT d'un tableau de bord régional d'indicateurs clés avec des cibles cohérentes avec les objectifs énoncés (Tableau 19).

De cette façon, l'ingénieur forestier qui prépare une prescription sylvicole peut bénéficier d'une certaine latitude professionnelle dans la détermination des modalités de récolte tout en respectant certains principes de base communs. Rappelons que les cibles n'ont pas été déterminées et que la poursuite des travaux de recherche en sylviculture devrait aider à les préciser, en particulier dans le cas des peuplements mixtes pour lesquels les connaissances sont moins avancées.

2. Afin de maximiser l'amélioration de la productivité des peuplements, les directives de récolte ou de martelage doivent chercher, le plus possible, à protéger les arbres du CFC, à régénérer la superficie en essences désirées et à récolter les arbres perdant de la VFbo.
3. Nous avons rassemblé à l'annexe 1 les informations les plus importantes afin de sélectionner les semenciers dans la CPI-RL ou les procédés de régénération menant à une structure régulière.

Il est important de préciser que, même si le sylviculteur tente de contrôler l'installation de la régénération qui s'établira naturellement après la coupe, le cumul des expériences passées démontre que les effets peuvent être très variables selon les modalités habituellement prescrites. Ces modalités sont reliées à l'ouverture du couvert et, parfois, à la préparation de terrain ou au nettoyage mécanique des gaules d'essences acceptables, par exemple (Bédard et DeBlois, 2010;

Prévost et Charrette, 2019; Nolet et autres, 2020; Bédard et autres, 2021; Bédard et autres [En prép.]).

Le contexte opérationnel ne permet pas toujours de synchroniser la coupe ou la préparation de terrain avec une année semencière, un synchronisme nécessaire pour établir la régénération des essences désirées plutôt que de stimuler celle des espèces concurrentes (Raymond, Prévost et Roy, 2020). Même si le sylviculteur parvient à installer une nouvelle régénération abondante en essences désirées, il n'est pas certain qu'elle dominera encore le site après 10 à 20 ans. Les principales raisons qui expliquent un tel résultat sont les suivantes :

- Les espèces préétablies peuvent réagir promptement à l'ouverture du couvert et reprendre leur place, du moins en partie.
- Les cervidés peuvent ralentir la croissance des espèces ligneuses qui viennent de s'établir, au bénéfice d'autres espèces herbacées ou ligneuses non broutées.
- La perte du couvert forestier, combinée à la compaction du sol par la machinerie, peut causer une hausse locale de la nappe phréatique au bénéfice d'une variété d'herbacées et d'arbustes qui concurrencent les essences forestières.

Par conséquent, il faut prévoir effectuer un minimum de suivi d'efficacité pour juger du succès de l'établissement de la régénération, puis effectuer des traitements d'éducation de celle-ci au besoin.

Recommandations

Nous formulons les recommandations suivantes :

- a) Ajouter aux prochains PAFIT un tableau de bord régional d'indicateurs clés avec des cibles cohérentes avec les objectifs énoncés.

À moyen et long terme :

- b) Poursuivre ces travaux dans le but de préciser les objectifs de régénération qui pourraient être poursuivis selon les essences recherchées et les traitements sylvicoles concernés, ainsi que préciser les cibles pour les peuplements mixtes.
- c) Communiquer aux prescripteurs régionaux les informations contenues dans ce rapport, notamment celles de l'annexe 1.

Tableau 19 Synthèse des indicateurs et des cibles proposées par défaut pour des traitements sylvicoles en phase d'ensemencement. Note : Le choix des indicateurs et des cibles se fait régionalement selon les orientations et objectifs du PAFIT; ces valeurs sont présentées à titre indicatif.

Indicateurs	Traitement	Modulation	Cibles proposées par défaut dans les érablières
Changement(s) de composition du couvert - Maintien ou augmentation d'une essence à promouvoir - Diminution d'une essence à maîtriser - Contrôle des essences acceptables (compagnes)	CJ, CPI-CP, CPI-RL	- Choix des essences selon la station - Applicabilité selon la précision de l'inventaire	Essence à promouvoir : % ST APC $\geq$ % ST AVC, mais $\leq$ 75 % de la ST _{tot} ¹ Essences à maîtriser : récolter au moins 80 % des HEG de 18 à 38 cm, ou les abaisser à moins d'un m ² /ha ¹ ; récolter au moins 80 % des ERR MO-SO de 24 à 38 cm, ou les abaisser à moins d'un m ² /ha ¹ Essences acceptables : % ST APC $\leq$ (% ST AVC + 4 %) ¹
Surface terrière résiduelle	CJ, CPI-CP, CPI-RL, CPR	Selon le traitement et la station	CJ : min. 16 m ² /ha dans 80 % des p.é., moy. de 18 à 20 m ² /ha CPI-CP : min. 14 m ² /ha dans 80 % des p.é., moy. de 16 à 18 m ² /ha CPI-RL : min. 10 m ² /ha dans 80 % des p.é., moy. de 12 à 14 m ² /ha CPR : min. 12 m ² /ha dans 80 % des p.é., moy. de 14 à 16 m ² /ha
Prélèvement en surface terrière	CJ, CPI-CP, CPI-RL	Selon l'ampleur des gros arbres	Maximum 10 m ² /ha dans 80 % des p.é. dans des peuplements de structure VIN; ce seuil peut monter à 12 m ² /ha dans des structures plus jeunes.
Changement de proportion du CFC induit par la récolte	CJ, CPI-CP, CPI-RL	Note : Les DMF ne sont pas dans le CFC.	% ST APC > % ST AVC
Proportion de la surface terrière en arbres à risque élevé de mortalité	CJ, CPI-CP, CPI-RL	Selon l'objectif de rendement	$\leq$ 25 % pour ne pas avoir plus de pertes par mortalité que dans les CJ 1995-1999 (voir Saucier et autres, 2021) - Permet de contribuer à la création de bois mort et d'attributs écologiques associés aux vieilles forêts
Quantité de bois (surface terrière ou volume) : sur pied, prélevé et croissance anticipée	CJ, CPI-CP, CPI-RL	Selon les objectifs et le potentiel de la station	CJ en volume DF1F2 : 22 m³/ha sur pied, prélèvement de 9 m³/ha pour une rotation de 25 ans² CPI-CP en volume DF1F2 : 18 m³/ha sur pied, prélèvement de 9 m³/ha pour une rotation de 30 ans (érablières)² CPI-RL : à définir
Densité des semenciers	CPI-RL, CPR, CRS	Choix des essences et de la proportion d'une essence en particulier	- De 20 à 35 semenciers bien répartis à l'hectare (toutes essences) - Pour le BOJ : au moins 10 semenciers à l'hectare

¹ Cible proposée en Outaouais et dans les Laurentides dans le cadre des travaux de Saucier et autres (2021).

² Pour une évaluation plus précise de l'accroissement anticipé selon la rotation, le lecteur est invité à consulter l'indicateur 1 du rapport de Saucier et autres (2021). Les rendements évalués ici sont basés sur une mise à jour des rendements des CJ pratiquées de 1995 à 1999 avec les modèles de répartition par produits mis à jour en 2021 par Filip Havreljuk (en prép.).

7. Balises d'application des traitements de coupes partielles dans les peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux

Mandat

Établir et préciser des balises d'application des traitements de coupes partielles dans les peuplements mixtes de BOJ et de résineux situés dans la zone tempérée nordique.

Les travaux ont porté sur les volets suivants :

1. Modélisation des cycles de coupe partielle dans les peuplements mixtes de BOJ et de résineux
2. Modélisation de l'évolution des gaules en essences désirées
3. Estimation du dénombrement et du coefficient de distribution (C.D.) des gaules en essences désirées
4. Approche diagnostique pour les peuplements dégradés ou appauvris (étude de cas)

1. Modélisation des cycles de coupes partielles dans les peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux

Prémisse

Depuis les années 1990, les peuplements mixtes de BOJ et de résineux (les BjR) sont majoritairement récoltés par coupe partielle (Guillemette, 2018). Au cours des années, plusieurs intensités de prélèvement ont été préconisées. Parmi l'ensemble des coupes partielles, la coupe progressive irrégulière (CPI) est maintenant souvent prescrite pour récolter les arbres à fort potentiel de mortalité de ces peuplements.

Afin d'aménager de manière durable les BjR, il est nécessaire de connaître la durée des cycles de coupe (rotations) et les facteurs qui les influencent.

Méthodologie

Nous avons utilisé les données provenant de neuf dispositifs expérimentaux de la DRF. Ces dispositifs sont localisés dans les sous-domaines bioclimatiques de l'érablière à bouleau jaune de l'est et de l'ouest et dans ceux de la sapinière à bouleau jaune de l'est et de l'ouest (Figure 12).

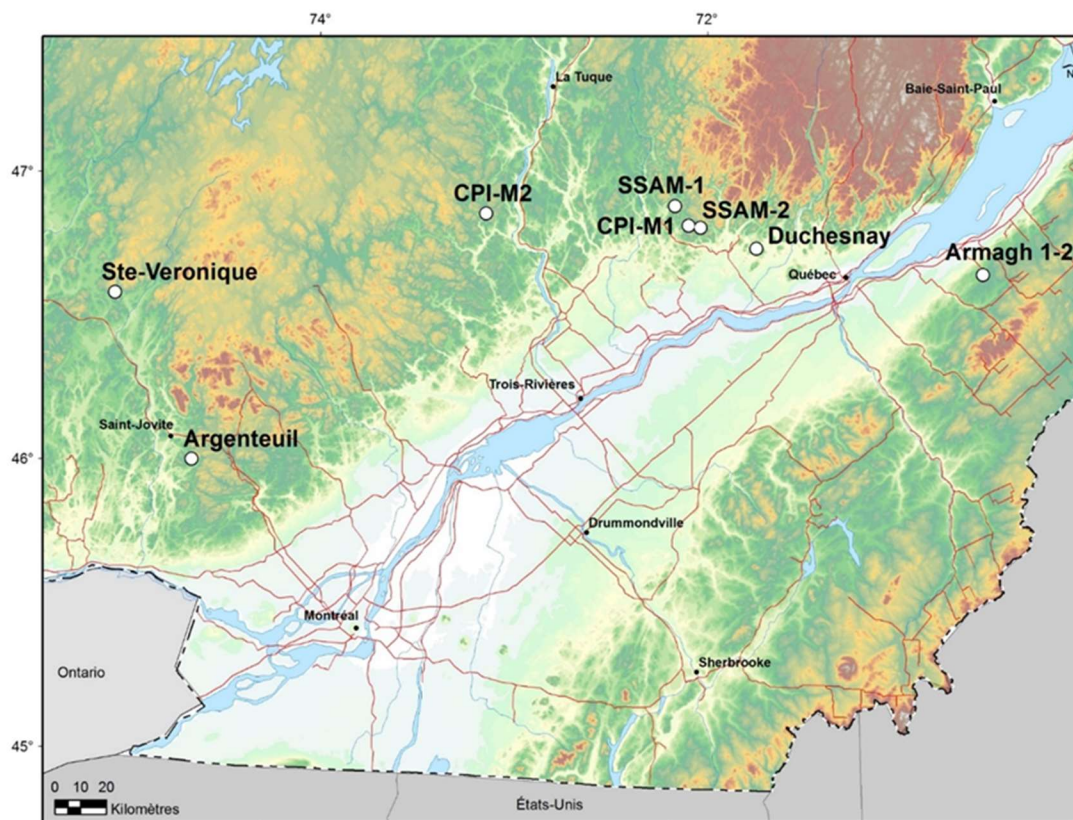


Figure 12 Localisation des dispositifs expérimentaux utilisés dans l'analyse du cycle de coupe (rotation) dans le modèle BJR

Les peuplements étaient dominés par le BOJ avec une composante importante d'épinettes et de sapins baumiers (SAB, tableau 20). Différents traitements de coupe partielle (CPICP, CJT, CJPJG, CJ) avec des intensités de prélèvement variant de 30 à 60 % de la ST marchande y ont été pratiqués entre les années 1987 et 2014. La récolte a ciblé en priorité les arbres avec le plus haut risque de mortalité, notamment les SAB.

Tableau 20 Composition en ST marchande (ST) et en volume marchand brut (VMB) des placettes avant et après le traitement en fonction de la ST marchande résiduelle

Groupe	Essence (et DHP)	ST (m ² ha ⁻¹)	Écart type ST (m ² ha ⁻¹)	VMB (m ³ ha ⁻¹)	Écart type VMB (m ³ ha ⁻¹)
Avant le traitement*	BOJ > 23 cm	9,0	4,2	72	36
	BOJ < 23 cm	1,8	1,0	10	6
	EPR-EPB	5,4	4,3	39	37
	SAB	6,1	4,5	39	29
	ERR > 23 cm	2,5	2,0	19	16
	ERR < 23 cm	1,3	1,4	6	6
	Autres	3,0	3,3	20	23
	Total	28,1	4,4	198	39
Après le traitement ST résiduelle 14 m ² ha ⁻¹	BOJ > 23 cm	5,2	2,5	40	20
	BOJ < 23 cm	1,2	0,8	6	4
	EPR-EPB	2,7	1,9	17	13
	SAB	1,4	0,8	6	4
	ERR > 23 cm	1,1	1,5	7	11
	ERR < 23 cm	0,7	0,7	3	3
	Autres	1,8	2,1	10	13
	Total	14,0	1,1	90	13
Après le traitement ST résiduelle 18 m ² ha ⁻¹	BOJ > 23 cm	8,6	2,5	66	20
	BOJ < 23 cm	1,6	0,8	8	4
	EPR-EPB	3,8	2,0	26	16
	SAB	1,6	1,2	7	6
	ERR > 23 cm	1,2	1,5	9	11
	ERR < 23 cm	0,5	0,5	2	3
	Autres	1,2	1,6	8	11
	Total	18,1	0,8	125	9

* Données basées sur les placettes témoins.

Les placettes de ces dispositifs ont été mesurées avant et après la coupe partielle, puis tous les 5 ans, pour une durée totale du suivi variant de 5 à 20 ans après la coupe.

Un modèle de croissance (modèle BjR) a été développé à partir des données de suivi de coupe partielle dans les BjR susmentionnées (Power et autres [En prép. a]). Ce modèle simule, pour les arbres de plus de 9 cm de diamètre, le risque de mortalité ainsi que l'accroissement en diamètre des survivants. Le modèle prédit aussi le recrutement sur la base de la composition du couvert des arbres de dimensions marchandes.

Afin de prévoir l'intervalle de temps entre les coupes partielles, le modèle BjR a simulé l'évolution des placettes traitées sur une période correspondant à la différence entre la dernière mesure (5 à 20 ans après la coupe) et celle 40 ans après la coupe. Ainsi, l'évolution des placettes a été simulée sur une période variant entre 20 et 35 ans. L'évolution des placettes a également été simulée à l'aide du modèle Artémis 2014 (version 4.2.0; Power, 2021) dans le but de combiner les prévisions des deux modèles et d'apporter plus de robustesse aux simulations.

Par la suite, les placettes ont été rassemblées en deux groupes basés sur la ST marchande résiduelle :

- a) Groupe de placettes ayant une ST marchande résiduelle faible, soit de 12 à 16 m² ha⁻¹ (ci-après « 14 m² ha⁻¹ »).
- b) Groupe de placettes ayant une ST marchande résiduelle élevée, soit de 16 à 20 m² ha (ci-après « 18 m² ha⁻¹ »).

Pour chacun des groupes, l'évolution de l'accroissement annuel de la ST marchande et du volume marchand brut (VMB), provenant des données recueillies sur le terrain ainsi que des simulations avec les modèles BjR et Artémis 2014, a été modélisée à l'aide d'une régression polynomiale. À partir de cette dernière, le nombre d'années nécessaires pour atteindre une ST marchande moyenne de 25 m² ha⁻¹ a été estimé.

Tous les détails de la méthode et des résultats seront éventuellement publiés dans Power et autres (en préparation b).

Résultats

L'accroissement annuel périodique en ST marchande augmentait initialement pour les deux groupes et atteignait des valeurs maximales de 0,40 m²·ha⁻¹·an⁻¹ (14 m² ha⁻¹) et de 0,36 m²·ha⁻¹·an⁻¹ (18 m² ha⁻¹). Un sommet survient entre 10 et 15 ans après la coupe. Par la suite, il y a diminution pour les deux groupes pour atteindre entre 0,18 m²·ha⁻¹·an⁻¹ (14 m² ha⁻¹) et 0,11 m²·ha⁻¹·an⁻¹ (18 m² ha⁻¹), 35 à 40 ans après la coupe (Figure 13a).

Le temps nécessaire pour reconstituer une surface terrière initiale de 25 m² ha⁻¹ a été évalué à 38 ans (14 m² ha⁻¹) et à 23 ans (18 m² ha⁻¹). Ainsi, le nombre d'années nécessaires est légèrement inférieur au pourcentage de prélèvement (44 et 28 %, respectivement). Comme règle du pouce, il faut donc compter en moyenne plus d'un an par 1 % de prélèvement pour reconstituer la surface terrière initiale.

L'accroissement annuel périodique en VMB était comparable entre les deux groupes jusqu'à 15 à 20 ans après la coupe. Par la suite, le groupe 14 m² ha⁻¹ présentait un accroissement en volume plus élevé que le groupe 18 m² ha⁻¹. (Figure 13b)

Quant à l'accroissement annuel moyen sur la période de rotation, il était le même pour les deux groupes, soit $0,29 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

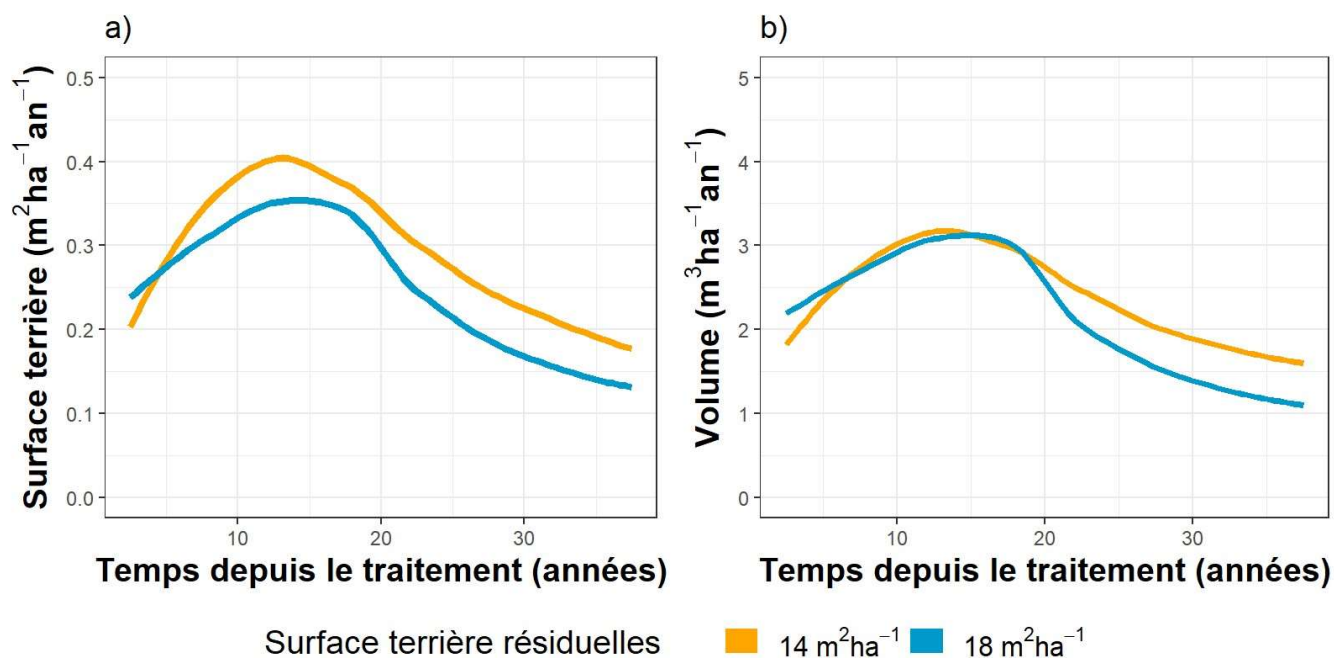


Figure 13 Accroissement annuel périodique en ST marchande et en volume marchand brut après coupe partielle en fonction des groupes de ST marchande résiduelle : « $14 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ » (12 à $16 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) et « $18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ » (16 à $20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) pour les prévisions combinées des deux modèles (BjR et Artémis 2014)

Discussion

Bien que l'accroissement annuel périodique en ST marchande et en VMB des peuplements traités à plus forte intensité ($14 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) soit plus élevé que celui des peuplements traités à plus faible intensité ($18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), cette performance n'est pas suffisante pour combler la différence initiale de ST marchande résiduelle, ce qui conduit à une rotation plus longue entre les coupes pour reconstituer une ST marchande de $25 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Étant donné que la ST marchande initiale des peuplements mixtes de BOJ et de résineux oscille généralement entre 25 et $30 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, on peut s'attendre à une rotation d'environ 25 ans pour des prélèvements de 30 % et à une rotation d'environ 40 ans pour un prélèvement avoisinant 45 % de la ST marchande initiale.

L'accroissement annuel moyen après coupe partielle du scénario $14 \text{ m}^2/\text{ha}$ -40 ans est semblable à celui du scénario $18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ -25 ans, mais le scénario plus long (40 ans) produit moins de ST marchande en grosses tiges de BOJ et plus de ST marchande des autres essences (Tableau 21). Cette situation n'est cependant pas indépendante de la composition après coupe; le prélèvement plus intense dans le groupe $14 \text{ m}^2/\text{ha}$ a laissé moins de BOJ en proportion des autres essences (Tableau 20).

Bien que ces résultats soient en accord avec les rotations suggérées par le Guide sylvicole du Québec (Ministère des Ressources naturelles, 2013b) dans les BjR de belle venue, cette analyse porte essentiellement sur la production en ST marchande. Il serait important de poursuivre les analyses afin

d'évaluer la durée des rotations en fonction d'autres critères importants dont, notamment, la qualité des produits du bois.

Tableau 21 Surface terrière marchande (ST), volume marchand brut et accroissement annuel moyen (AAM) de ces deux variables à la fin du cycle de coupe en fonction de la ST marchande résiduelle et de la durée du cycle de coupe partielle, d'après les simulations des modèles BjR et Artémis 2014

Scénario	Essence (et DHP)	ST (m ² ha ⁻¹)	Écart type ST (m ² ha ⁻¹)	AAM ST (m ² ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Écart type Vol. (m ³ ha ⁻¹)	AAM Vol. (m ³ ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)
ST résiduelle 14 m ² ha ⁻¹ , cycle de 20 ans	BOJ > 23 cm	7,2	3,2	0,10	58	28	1,0
	BOJ < 23 cm	1,0	0,6	0,00	5	4	0,0
	EPR-EPB	4,6	3,4	0,10	32	23	0,7
	SAB	2,9	1,5	0,07	16	9	0,5
	ERR > 23 cm	1,8	2,1	0,04	14	17	0,3
	ERR < 23 cm	0,8	0,7	0,01	4	4	0,1
	Autres	2,3	2,9	0,01	15	19	0,1
	Total	20,6	3,1	0,33	143	25	2,7
ST résiduelle 14 m ² ha ⁻¹ , cycle de 40 ans	BOJ > 23 cm	8,0	3,3	0,07	67	29	0,7
	BOJ < 23 cm	1,1	0,4	0,00	6	2	0,0
	EPR-EPB	6,2	4,4	0,09	46	33	0,7
	SAB	3,7	2,1	0,06	21	13	0,4
	ERR > 23 cm	2,5	2,4	0,04	19	19	0,3
	ERR < 23 cm	0,9	0,5	0,01	5	3	0,0
	Autres	2,9	3,4	0,03	19	24	0,2
	Total	25,3	4,0	0,28	182	32	2,3
ST résiduelle 18 m ² ha ⁻¹ , cycle de 25 ans	BOJ > 23 cm	11,7	2,7	0,13	96	23	1,2
	BOJ < 23 cm	1,3	0,6	-0,01	7	4	-0,1
	EPR-EPB	5,5	2,8	0,07	40	21	0,5
	SAB	3,0	1,6	0,06	17	11	0,4
	ERR > 23 cm	1,7	1,9	0,02	13	15	0,2
	ERR < 23 cm	0,5	0,4	0,00	2	2	0,0

Scénario	Essence (et DHP)	ST (m ² ha ⁻¹)	Écart type ST (m ² ha ⁻¹)	AAM ST (m ² ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Écart type Vol. (m ³ ha ⁻¹)	AAM Vol. (m ³ ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)
	Autres	1,5	2,2	0,01	10	16	0,1
	Total	25,2	2,1	0,29	186	20	2,4

Puisque les bénéfices des coupes partielles sur l'accroissement en ST marchande et en VMB se produisent surtout lors des 10 à 15 premières années après l'intervention, des scénarios sylvicoles plus intensifs pourraient être envisagés dans les BjR.

Par exemple, si l'on souhaite réaliser un scénario sylvicole intensif avec les peuplements étudiés, les résultats indiquent qu'il serait préférable de pratiquer une rotation de 20 à 25 ans. Avec un accroissement annuel moyen variant de 0,29 m²·ha⁻¹·an⁻¹ à 0,33 m²·ha⁻¹·an⁻¹, il serait possible de récolter près de 7 m²/ha à la fin de la rotation. Quant à l'intervalle de ST marchande résiduelle à viser, les résultats démontrent que le rendement n'y est pas très sensible entre 14 et 18 m²/ha au cours des 20 premières années. Une ST marchande résiduelle d'environ 16 m²/ha pourrait alors être ciblée tout en permettant une certaine variation autour de cette cible.

Néanmoins, les effets des scénarios plus intensifs sur d'autres paramètres mériteraient d'être approfondis. En effet, la densité du peuplement résiduel peut influencer d'autres facteurs, tels que la trajectoire de composition du peuplement, la régénération, la qualité des arbres et le panier de produits du bois. Une faible densité résiduelle peut diminuer à long terme la composante résineuse des peuplements mixtes, favoriser l'envahissement par des espèces concurrentes nuisibles à la régénération naturelle et augmenter le risque de formation de branches adventives, de descente de cime et de déclassement de la qualité des tiges de BOJ (Ministère des Ressources naturelles, 2013 b). Les travaux de recherche réalisés jusqu'à maintenant dans les BjR ne tendent pas à recommander des ST marchandes résiduelles en deçà de 14 m² ha⁻¹ (Ministère des Ressources naturelles, 2013 b; Raymond et autres, 2018).

2. Modélisation de l'évolution des gaules en essences désirées

Prémisse

Les procédés de régénération utilisés dans les peuplements BjR du Québec depuis les années 1990 se basent généralement sur des coupes partielles réalisées à intervalle de temps régulier.

Afin de permettre la récolte périodique d'un volume de bois suffisant en essences désirées, il est nécessaire que la régénération naturelle de ces peuplements puisse remplacer les arbres récoltés lors de la coupe partielle. Cependant, peu d'outils existent pour prévoir, à partir de la régénération en place après coupe, la quantité d'arbres de dimensions marchandes qui peut être attendue lors de la réalisation de la prochaine coupe partielle.

Méthodologie

Les données de trois dispositifs expérimentaux suivis sur une période variant de 15 à 20 ans ont été utilisées pour simuler la croissance et la mortalité des gaules présentes après coupe. Les dispositifs étaient localisés dans des peuplements BjR du sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'est (Armagh-1 et Armagh-2) et dans celui de la sapinière à bouleau jaune de l'est (Duchesnay, figure 12). L'année suivant la coupe, l'ensemble des gaules ($1,1 \text{ cm} < \text{DHP} < 9,0 \text{ cm}$) ont été numérotées, puis mesurées à nouveau à intervalle de 5 ans.

Un modèle basé sur des matrices de transition, combinant la probabilité de mortalité et la probabilité de changement de classe de diamètre, a été ajusté pour le BOJ, l'ERR, le SAB, l'EPR et pour un groupe incluant les autres essences commerciales des peuplements. Le modèle fonctionne de manière indépendante pour chacune des essences et s'adapte à la composition du gaulis à simuler sans être influencé par la composition en essences des peuplements ayant servi à le paramétrer.

Le modèle a été utilisé pour prévoir le rendement en ST des essences commerciales des gaules présentes après une coupe partielle en fonction du temps après traitement, ainsi que le nombre de gaules nécessaires pour produire une unité de ST marchande en fonction de ce même temps.

Tous les détails de la méthode et des résultats sont publiés dans Power et autres (2022).

Résultats

Le rendement en ST des gaules augmente en fonction du temps après traitement, mais avec une forte variabilité entre les placettes (Figure 14). Par exemple, après 40 ans, la placette au plus faible rendement prévoit $1,2 \text{ m}^2/\text{ha}$, tandis que celle au plus fort rendement prévoit $8,5 \text{ m}^2/\text{ha}$ issus de la croissance des gaules après coupe.

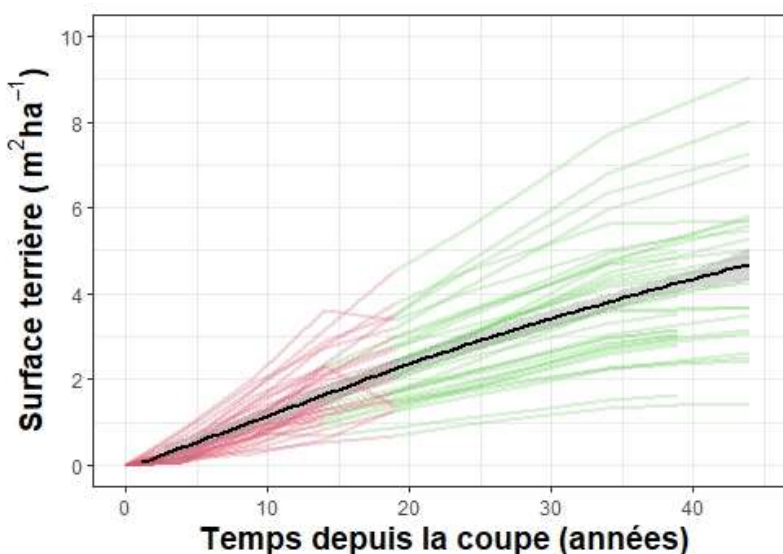


Figure 14 Variation autour de la moyenne des prévisions de la ST issue des gaules du peuplement résiduel en fonction du temps depuis la coupe partielle

Le modèle montre que le nombre de gaules nécessaires pour produire une unité de ST marchande varie grandement en fonction de l'essence, du DHP de la gaulle et du temps depuis la coupe partielle. Parmi les quatre principales essences, le BOJ est celui qui produit le plus de ST marchande par gaulle, ensuite

viennent l'ERR et les deux essences résineuses (Figure 15, Tableau 22). Les gaules de 2 cm se démarquent nettement des autres par le plus grand nombre nécessaire pour produire $1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de ST marchande. Plus le nombre d'années est grand depuis la coupe partielle, moins le nombre de gaules nécessaires pour produire une unité de ST marchande est élevé. Ce dernier résultat est particulièrement marqué pour les gaules de 2 cm.

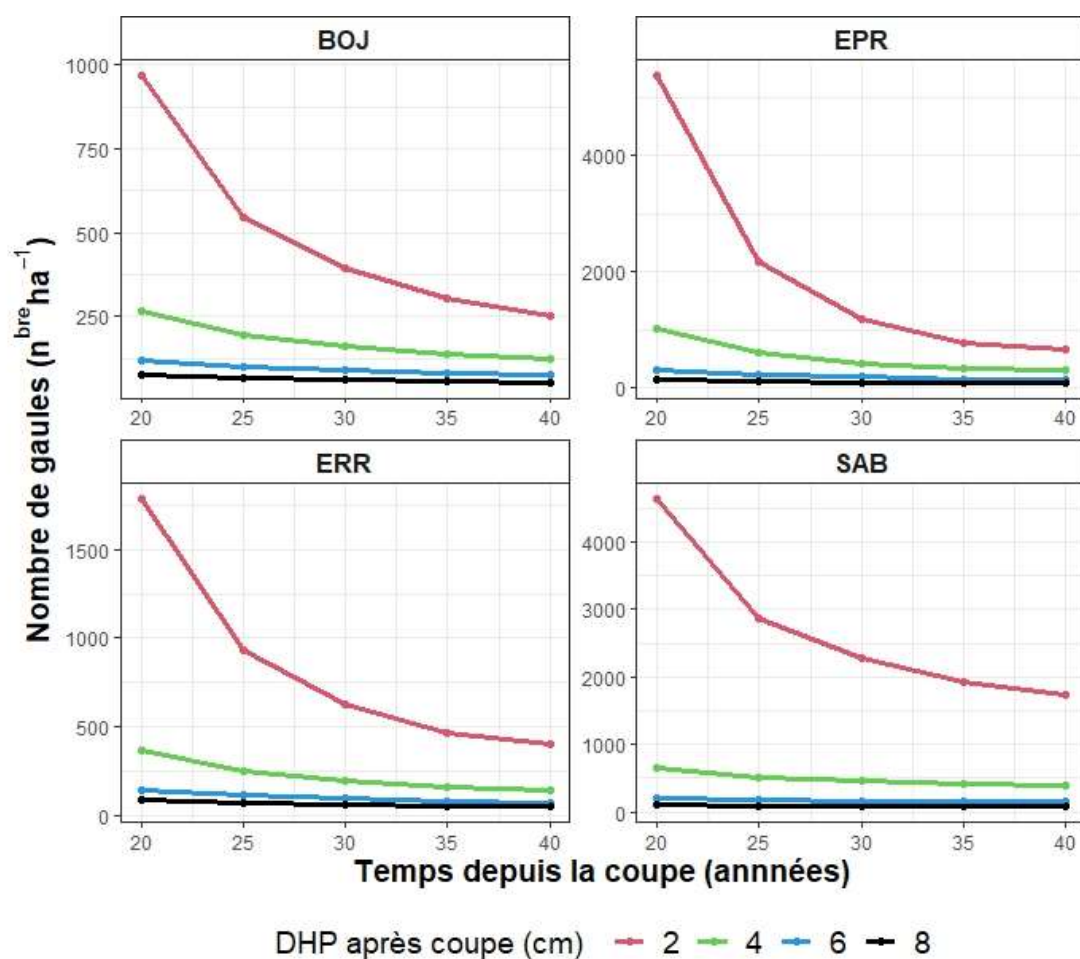


Figure 15 Nombre de gaules nécessaires après la coupe pour produire une unité de ST marchande ($1 \text{ m}^2/\text{ha}$) en fonction de l'essence, du DHP et du temps écoulé depuis la coupe partielle dans les BjR

Tableau 22 Nombre de gaules nécessaires à la production d'une unité de ST marchande ($1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) en fonction de l'essence, du DHP de la gaulle et du temps après la coupe partielle dans les BJR

DHP initial (cm)	Années après la coupe	BOJ	ERR	EPR	SAB
2	20	968	1787	5392	4631
2	25	547	935	2167	2871
2	30	395	628	1187	2280
2	35	307	467	771	1933
2	40	252	398	666	1740
4	20	264	364	1013	661
4	25	195	251	598	521
4	30	162	194	415	465
4	35	138	157	316	424
4	40	123	139	287	399
6	20	122	142	292	201
6	25	102	113	221	179
6	30	91	94	178	168
6	35	81	80	149	157
6	40	75	72	139	151
8	20	77	82	127	101
8	25	67	69	108	92
8	30	61	60	94	87
8	35	56	52	81	81
8	40	53	47	76	79

Discussion

La ST marchande qui peut être attendue des gaules de 20 à 40 ans après la coupe varie beaucoup entre les placettes. Cette variabilité est due au nombre de gaules présentes après la coupe, aux essences ainsi qu'à leur DHP au moment de la coupe.

Les placettes qui comptent un grand nombre de gaules, notamment d'essences feuillues et de forts diamètres, sont celles qui peuvent contribuer le plus à la future ST marchande du peuplement. Ces résultats montrent l'importance de bien protéger les gaules lors des opérations de récolte,

particulièrement celles de fortes dimensions, puisque celles-ci permettent de produire une même unité de ST marchande avec un nombre beaucoup moins élevé de gaules.

L'outil ne devrait être utilisé que dans les BjR de belle venue, puisqu'il a seulement été paramétré dans ce type de peuplement. Pour les autres types de peuplements mixtes, il ne devrait être utilisé qu'à titre indicatif. L'outil pourrait être utilisé pour évaluer des cas types basés sur des scénarios d'abondance des gaules ou pour prédire l'évolution des gaules à partir d'un inventaire de gaules par dénombrement. Dans ce dernier cas, il faudra connaître le dénombrement des gaules par essence et par classe de DHP pour l'utiliser, en plus de porter une attention à la précision de l'échantillonnage lors de l'inventaire.

3. Estimation des gaules en essences désirées

Prémisse

L'intérêt d'utiliser un modèle prédictif de l'évolution du nombre de gaules et des prévisions du recrutement basées sur le nombre de gaules lors du diagnostic sylvicole dépend de la capacité d'alimenter le modèle de l'évolution des gaules en essences désirées à partir d'un inventaire qui comprend un dénombrement par essence et par classe de diamètre. Un tel inventaire est toutefois coûteux à réaliser, c'est pourquoi il importe d'optimiser le plan d'échantillonnage sur le terrain.

Nous avons voulu vérifier le nombre de microplacettes de gaules, en fonction de leur taille et de leur disposition, qu'il faudrait réaliser pour alimenter les modèles avec un inventaire de gaules d'une précision acceptable. Nous avons aussi vérifié la précision d'un inventaire du C.D. des gaules.

Méthodologie

Des inventaires par échantillonnage ont été simulés dans des placettes de recherche pour lesquelles toutes les gaules étaient dénombrées et leur position connue. Ainsi, 28 peuplements feuillus ou mixtes à dominance feuillue ont été utilisés. Des plans d'échantillonnage aléatoire, en grappes linéaires de 5 ou 10 microplacettes, de même qu'en croix de 5 microplacettes, et ce, pour des nombres variant de 10 à 300 microplacettes, ont été simulés. Un gradient de 5 tailles de microplacettes, variant de 4 à 25 m², a aussi été simulé.

Ces simulations ont permis d'estimer la variance de la densité de gaules permettant de calculer le nombre de microplacettes requises selon la marge d'erreur (E) acceptée par le sondeur et de calculer les C. D. par essence.

Tous les détails de la méthode et des résultats seront éventuellement publiés dans Guillemette et autres (en préparation c).

Résultats

La façon de répartir l'échantillonnage (aléatoire, en croix ou en grappe) a une influence relativement faible sur la variance de la densité (résultats non présentés). La densité de gaules à l'hectare était toutefois une variable beaucoup plus significative pour expliquer la variance. Pour une même précision recherchée, il faut beaucoup plus de microplacettes de gaules lorsque la population d'intérêt est petite que lorsqu'elle est grande (Figure 16 a et b).

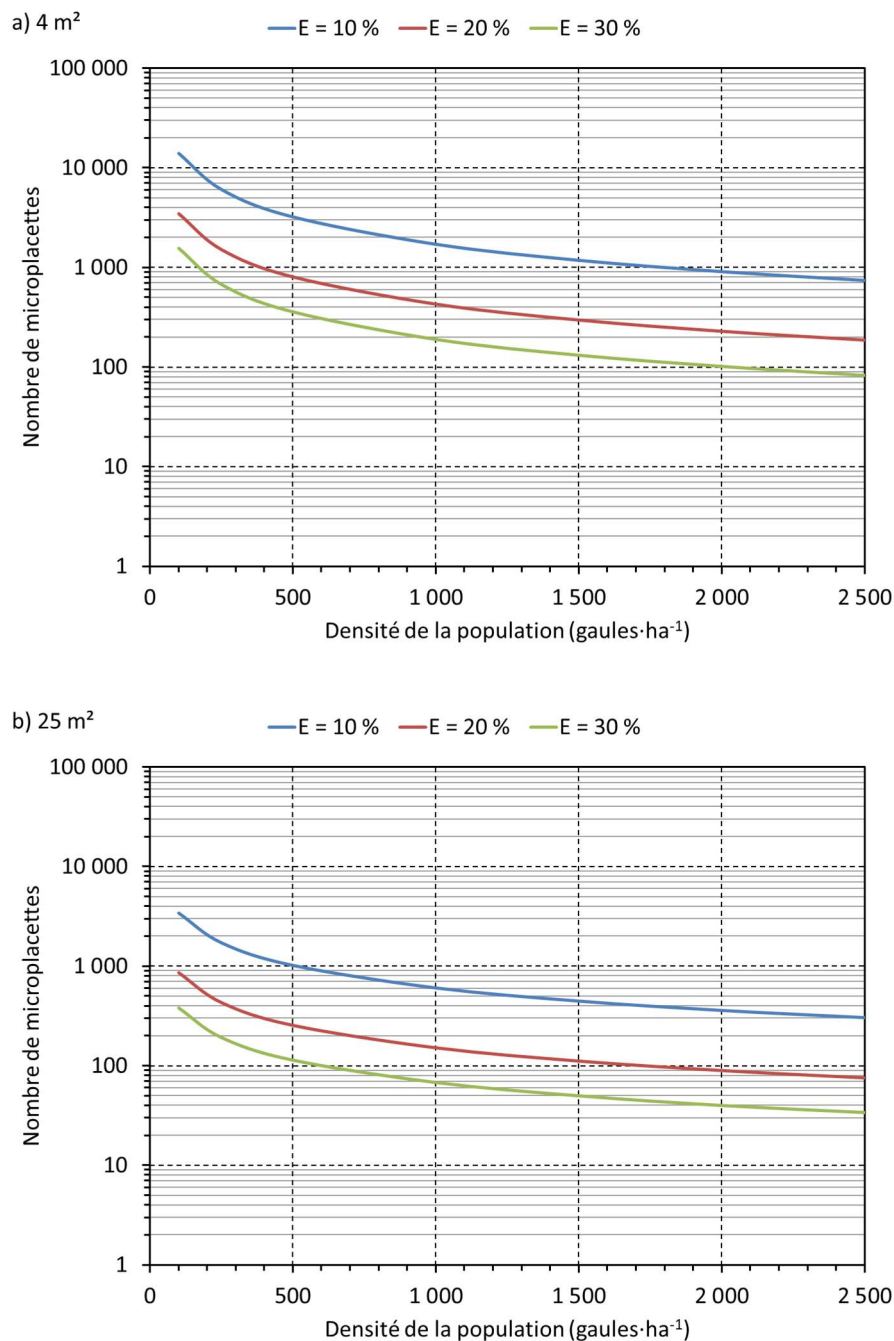


Figure 16 Relations entre le nombre de microplacettes requises et la densité de gaules dans la population ciblée dans les peuplements feuillus ou mixtes à dominance feuillue, selon trois niveaux de marge d'erreur (E) relative acceptée avec des grappes de 10 microplacettes de 4 m² (a) ou de 25 m² (b)

Par exemple (Figure 16a), en acceptant une marge d'erreur de 30 %, de 19 fois sur 20, avec des grappes de 10 microplacettes de 4 m² :

- ✓ il faut 1 600 microplacettes (166 grappes de 10 microplacettes) pour une population de 100 gaules à l'hectare

- ✓ il faut 220 microplacettes (22 grappes de 10 microplacettes) pour une population de 1 000 gaules à l'hectare.

La marge d'erreur acceptée a aussi un effet important. Par exemple, entre une marge d'erreur de 30 % et une de 10 % dans une population de 1 000 gaules à l'hectare échantillonnée avec des placettes de 4 m², le nombre de grappes requises passe respectivement de 22 à 191.

La taille des placettes a également un effet notable. Dans le même exemple avec une marge d'erreur de 30 % dans une population de 1 000 gaules à l'hectare, le nombre de grappes de 10 microplacettes requises passe de 22 à 9 pour des tailles de microplacettes de 4 et 25 m², respectivement. Notons toutefois que l'aire cumulée de ces microplacettes est plus importante avec de grandes placettes ($90 \times 25 \text{ m}^2 = 2\,250 \text{ m}^2$) qu'avec de plus petites microplacettes ($220 \times 4 \text{ m}^2 = 880 \text{ m}^2$).

Finalement, le nombre de microplacettes requises pour atteindre une marge d'erreur de 10 ou 20 % sur le C.D. est relativement faible, soit des maximums de 100 et 25 microplacettes respectivement (Figure 17). Notons que la taille des microplacettes n'a pas d'impact sur ces nombres et que l'effet d'une répartition spatiale qui n'est pas entièrement aléatoire (grappe ou croix) a été jugé négligeable (ajout de seulement quelques placettes).

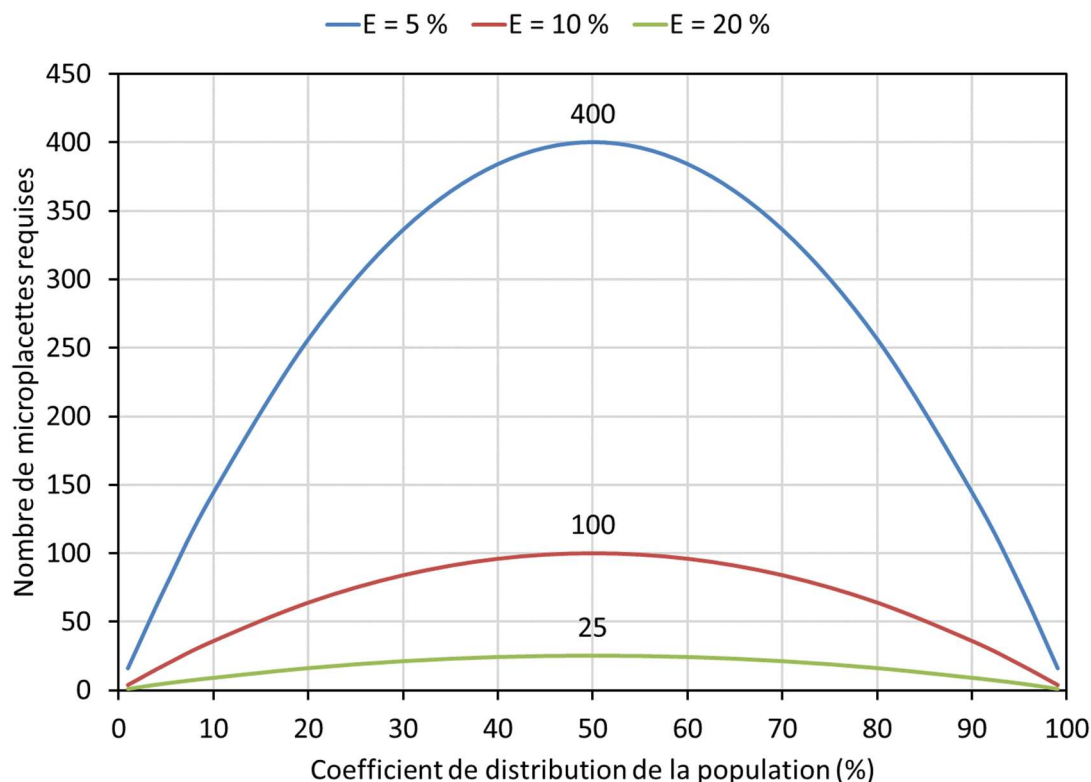


Figure 17 Relations théoriques entre le nombre de microplacettes requises et le coefficient de distribution des gaules, selon trois niveaux de marge d'erreur (E) acceptée

Discussion

Lors du diagnostic sylvicole, il est rare de disposer de plus d'une ou de deux centaines de microplacettes de 4 ou de 25 m² dans lesquelles les gaules ont été dénombrées.

Selon les informations tirées de la figure 16, ce contexte implique qu'en tolérant une marge d'erreur de 30 %, une information suffisamment précise peut être obtenue pour des groupes d'environ 1 000 à 2 500 gaules à l'hectare avec des placettes de 4 m², ou d'environ 250 à 1 000 gaules à l'hectare avec des placettes de 25 m². Par conséquent, il faudrait réaliser beaucoup plus de placettes si l'on souhaitait obtenir un niveau de précision acceptable pour utiliser les modèles de gaules (section 2 du chapitre 2 ou section 2 du chapitre 7), lesquels requièrent des dénombrements par essence et classe de DHP, soit pour des populations d'une taille souvent inférieure à 100 gaules/ha. À titre indicatif, si l'on souhaitait obtenir une précision de 30 % pour un groupe de gaules (essence et DHP) estimé à environ 200 gaules/ha, il faudrait réaliser environ 260 microplacettes de 25 m² ou 870 microplacettes de 4 m².

Néanmoins, les modèles de gaules peuvent être utiles pour obtenir des connaissances sur leur dynamique à ce stade de développement, notamment par la réalisation d'études de cas plus approfondies. L'analyse de la variation du C.D. a démontré qu'il est beaucoup plus facile d'obtenir une bonne précision de cette variable qu'avec des données de densité moyenne. Pour faire suite à ces travaux, il serait pertinent d'évaluer pour chaque essence la correspondance du C.D. avec la densité moyenne observée.

Notons que le nombre d'hectares (taille de la population) n'a pas d'impact sur le nombre de placettes requises (Blais, 2014), sauf si la population est vraiment très petite. Le nombre d'échantillons dépend seulement de la variabilité de la population d'intérêt (variance) avec la taille des microplacettes et de la marge d'erreur que le sylviculteur est prêt à accepter. Puisque cette variabilité augmente dans les populations moins denses, il pourrait être pertinent de regrouper des essences ou des classes de DHP afin d'améliorer la précision de l'inventaire obtenu par échantillonnage. De plus, si l'on ne dispose pas des moyens requis pour atteindre un nombre souhaité de placettes en augmentant la densité de l'échantillonnage, il pourrait être préférable de regrouper des peuplements similaires afin d'atteindre la cible du nombre de placettes requises pour la marge d'erreur tolérée.

4. Approche diagnostique pour les peuplements dégradés ou appauvris (étude de cas)

Prémisse

Au Québec, nous souhaitons aménager des forêts saines, productives et résilientes afin qu'elles puissent répondre longtemps aux besoins de la société. On désire aussi maintenir le caractère fonctionnel des forêts pour maximiser leur résilience, étant donné l'incertitude liée aux changements globaux (Messier et autres, 2019). Or, un aménagement forestier qui miserait sur la complexité structurale et la diversité des espèces favoriserait aussi la diversité fonctionnelle (Thom et autres, 2021) et la séquestration du carbone (Thom et Keeton, 2019).

Les peuplements en santé et productifs de structure inéquienne ou irrégulière ont en commun une quantité suffisante d'arbres vigoureux et de qualité à tous les stades de développement. C'est souvent le cas dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune et cela permet d'assurer leur pérennité.

Les travaux visaient à développer une approche conceptuelle pour baliser la prise de décision sylvicole, notamment lorsque certains critères diagnostics ne sont pas atteints (Raymond et autres [En prép.]). L'identification des situations qui pourraient nécessiter des interventions sylvicoles, lorsque certaines composantes de ces peuplements sont manquantes, a été faite à l'aide de données de la DRF.

Méthodologie

Les travaux ont été réalisés à l'aide des données du projet de caractérisation des peuplements dégradés qui comprend 15 ans d'observation de peuplements traités en coupe à diamètre limite entre 1970 et 1990 dans les régions de la Mauricie, de la Capitale-Nationale et du Bas-Saint-Laurent (Power et autres, 2019).

Seules les placettes des végétations potentielles les plus abondantes ont été retenues : FE3, MJ1, MJ2, MS1, MS2 et RS1.

Chacun des 135 peuplements, représentés par des regroupements de placettes de 200 m² de même végétation potentielle sur une même unité de sondage, a été évalué selon trois critères diagnostiques de fonctionnalité :

- ✓ **CFC peuplement** : Un capital forestier en croissance $\geq 9,0$ m²/ha en arbres d'essences désirées de DHP $> 9,0$ cm (sauf SAB de DHP $\leq 19,0$ cm), vigoureux avec potentiel de sciage, de classes I et V (Majcen et autres, 1990);

- ✓ **CFC perches** : Un capital forestier en croissance $\geq 3,0 \text{ m}^2/\text{ha}$ en perches d'essences désirées de DHP variant de 9,01 à 23,0 cm, vigoureux avec potentiel de sciage, de classes I et V (Majcen et autres, 1990);
- ✓ **Régénération** : Un C.D. $\geq 60 \%$ en gaules d'essences désirées (BOJ, BOP, ERS, CHR, EPB, EPN, EPR, SAB, THO, PRU, PIB, PIG) de DHP variant de 1,01 à 9,0 cm (placettes de 9 m^2)⁷.

Tous les détails de la méthode et les résultats seront publiés dans Raymond et autres (en préparation).

Résultats

Après 15 ans d'observation, seulement 21 % des peuplements atteignaient les conditions demandées pour les trois critères diagnostiques de fonctionnalité (Figure 18). Néanmoins, 47 % des peuplements remplissaient au moins deux critères. La situation la plus fréquente (36 %) correspondait à des CFC peuplement et perches satisfaisants, avec une régénération insuffisante. Les 33 % des peuplements restants nécessiteraient des travaux plus importants avec seulement un (27 %) ou aucun (6 %) critère satisfait.

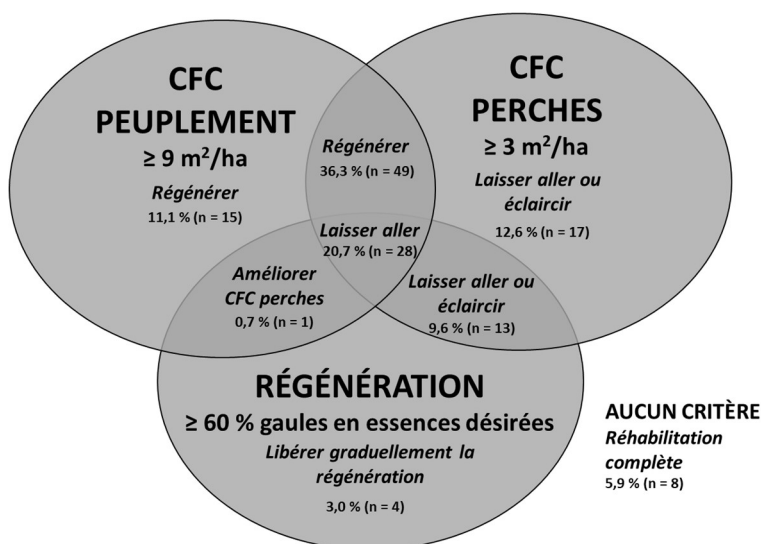


Figure 18 Nombre et proportion des peuplements étudiés qui respectent les critères de fonctionnalité après 15 ans d'observation (n total = 135), soit 26 à 58 ans après la coupe à diamètre limite

⁷ Les placettes de 9 m^2 (rayon = 1,69 m) couvrent 1 111 emplacements par hectare. Ainsi, un coefficient de distribution de 60 % équivaut à 667 gaules bien réparties par hectare.

Ces résultats indiquent qu'une bonne partie des peuplements pourrait nécessiter certaines interventions sylvicoles ciblées. Au point de vue sylvicole :

- plus de la moitié des peuplements aurait besoin d'une intervention pour établir la régénération;
- le quart des peuplements aurait besoin d'une intervention pour améliorer le CFC du peuplement;
- le septième des peuplements aurait besoin d'une intervention pour augmenter le CFC des perches.

L'examen plus approfondi de ces mêmes critères en fonction des végétations potentielles révèle que c'est surtout la régénération qui est problématique (Tableau 23). En moyenne, aucune végétation potentielle n'atteignait le critère minimal de 60 % de C.D. Les végétations potentielles à dominance résineuse MS1 et RS1 avaient moins de 40 % de C.D.

Tableau 23 Caractéristiques moyennes des peuplements en fonction de la végétation potentielle après 15 ans d'observation (26 à 58 ans après coupe)

Végétation potentielle	n peuplements	ST marchande (m ² /ha)	CFC peuplement (m ² /ha)	CFC perches (m ² /ha)	Gaules (% C. D.)
FE3	28	26,4 ± 1,6	12,1 ± 1,1	4,2 ± 0,4	43,9 ± 4,0
MJ1	14	29,3 ± 2,9	10,6 ± 1,5	5,9 ± 0,7	45,4 ± 7,5
MJ2	50	25,4 ± 1,0	11,3 ± 0,6	5,8 ± 0,4	42,4 ± 3,2
MS1	18	23,9 ± 2,1	13,1 ± 2,1	3,9 ± 0,7	30,7 ± 6,0
MS2	16	24,2 ± 1,8	13,0 ± 1,6	10,0 ± 1,7	50,5 ± 7,6
RS1	9	30,7 ± 3,5	19,0 ± 3,5	3,4 ± 0,8	35,6 ± 10,9

Discussion

Les travaux sur la caractérisation et la réhabilitation des peuplements dégradés et appauvris par la coupe à diamètre limite montrent que les peuplements mixtes sont plutôt résilients et peuvent améliorer leur CFC avec le temps en absence d'intervention (Power et autres, 2019; Raymond et autres, 2020). Cependant, un effort sylvicole serait nécessaire pour améliorer la qualité des bois (Raymond et autres, 2020).

La présente étude met en lumière les problèmes d'établissement de la régénération naturelle que ces coupes ont pu occasionner et rappelle l'importance de ne pas baser la prise de décision sylvicole uniquement sur les caractéristiques du bois sur pied. La connaissance de la distribution et du nombre de gaules apparaît importante pour raffiner le diagnostic sylvicole. Ces résultats préliminaires indiquent également qu'il pourrait être nécessaire de réaliser des traitements sylvicoles d'appoint, tels que le scarifiage ou la plantation d'enrichissement, en particulier lorsque les coupes sont faites en présence de neige au sol ou avec de la machinerie qui crée peu de nouveaux microsites favorables à la régénération naturelle.

Bien qu'elle ne remplace pas les outils d'aide à la décision menant à une prescription sylvicole adaptée aux conditions régionales, cette approche fonctionnelle peut être utilisée pour détecter les problèmes et aider à prioriser les actions.

- ✓ Lorsque le CFC du peuplement est suffisant et que la régénération est insuffisante, le sylviculteur ou la sylvicultrice priorisera des modalités d'intervention visant à établir une nouvelle cohorte de régénération. Cela peut, au besoin, intégrer des traitements de scarifiage et d'enrichissement dans le scénario sylvicole.
- ✓ Lorsque seul le CFC des perches est suffisant, le sylviculteur ou la sylvicultrice peut soit laisser croître le peuplement ou procéder à une éclaircie commerciale si le peuplement est trop dense à cause d'un nombre élevé de perches.
- ✓ Lorsque seule la régénération est suffisante et que les autres critères fonctionnels sont insuffisants (c'est-à-dire que le peuplement est peu vigoureux et/ou de faible qualité), le sylviculteur ou la sylvicultrice priorisera des modalités d'intervention visant à libérer graduellement la régénération.
- ✓ Enfin, lorsqu'aucun critère n'est atteint, le peuplement est dans un état de dégradation important. Le sylviculteur ou la sylvicultrice priorisera alors une réhabilitation complète, incluant la plantation. Afin de maximiser la productivité et la séquestration du carbone des peuplements, il serait judicieux de prioriser les investissements dans les peuplements qui sont peu ou pas fonctionnels. Les superficies nécessitant une réhabilitation complète pourraient être utilisées, par exemple, pour mettre de l'avant des stratégies d'adaptation aux changements climatiques, telles que la migration assistée.

Conclusion

Les travaux montrent qu'il peut être risqué d'axer les décisions sylvicoles seulement sur des critères de ST ou de volume. L'étude sur les critères de fonctionnalité (CFC peuplement, CFC perches et C.D. gaules) dans des peuplements traités en coupe à diamètre limite entre 1970 et 1990 révèle qu'environ la moitié des peuplements avaient une régénération insuffisante de 28 à 56 ans après intervention. Les problèmes étaient exacerbés dans les végétations potentielles à dominance résineuse MS1 et RS1 (C.D. < 40 %). Un petit pourcentage des peuplements (6 %) nécessiterait tout de même une réhabilitation complète, puisqu'aucun critère n'était satisfait. Les résultats de cette étude de cas montrent bien l'importance de connaître l'état de la régénération, notamment les gaules, afin de prescrire le bon scénario sylvicole, qui doit être pris en compte au même titre que les caractéristiques du bois sur pied.

La modélisation du nombre de gaules en essences désirées montre que ce sont celles qui ont les plus fortes dimensions qui vont contribuer le plus au renouvellement de la surface terrière du futur peuplement. Il importe donc d'éviter de les abîmer lors des travaux de récolte. Cet outil de modélisation nouvellement développé nécessite toutefois des données d'inventaire de dénombrement par essence et classe de 2 cm, à partir de la classe de 2 cm de DHP. Comme les inventaires de ce type sont plus longs à réaliser et plus coûteux que les inventaires d'occurrence (présence/absence) servant au calcul du C.D., nous avons examiné comment les méthodes d'inventaire pouvaient influencer leur précision.

Il apparaît que la disposition spatiale (aléatoire, en croix, en ligne) des microplacettes de dénombrement des gaules sur le terrain influence peu la précision. La densité des gaules présentes sur le terrain influence davantage la précision, le nombre de microplacettes requises étant plus grand lorsque la densité des gaules est faible. En outre, cette étude montre que le nombre de microplacettes de dénombrement requis pour obtenir une précision acceptable est tout de même élevé en comparaison avec le nombre de microplacettes d'occurrence (présence/absence) nécessaires au calcul du C.D. de la régénération. Cette dernière méthode pourrait donc être privilégiée pour nous informer sur l'abondance de gaules présentes avant intervention pour des fins de diagnostic sylvicole.

Des travaux supplémentaires devront être réalisés afin de permettre l'intégration de ces nouvelles connaissances à l'aménagement forestier. Parmi ces travaux, l'étude de la transition des tiges entre les stades de régénération, de gaules, de perches et d'arbres matures de grandes dimensions devra se poursuivre afin de bien comprendre les effets des traitements sylvicoles sur le développement des peuplements. Jumelés à des études de cas, ces résultats pourraient mener à l'élaboration de logigrammes diagnostiques sylvicoles et, ainsi, guider la prise de décision en sylviculture des peuplements mixtes tempérés.

Recommandations

Nous formulons les recommandations suivantes :

- a) Réaliser des inventaires de C.D. des gaules avec des microplacettes (4 m² de préférence) pour connaître l'état du renouvellement du peuplement lors du diagnostic sylvicole.

À moyen et long terme :

- b) Étudier divers scénarios sylvicoles pour les BjR à l'aide d'études de cas, notamment des cas pour lesquels la qualité des peuplements offre peu de potentiel d'amélioration par la coupe partielle et pour lesquels le sylviculteur ou la sylvicultrice viserait à produire un volume donné de bois d'œuvre feuillu pour la prochaine rotation.
- c) Améliorer la mise en œuvre de l'outil du nombre de gaules d'essences désirées, pour notamment évaluer l'ampleur du recrutement nécessaire (nombre de m²/ha de recrues) en cours de rotation et la quantité de gaules qui y est associée.
- d) Poursuivre les travaux sur les méthodes d'échantillonnage et d'inventaire des gaules en essences désirées pour, entre autres, établir des corrélations moyennes entre le C.D. et la densité des gaules.
- e) Donner aux régions les moyens financiers de réaliser les traitements sylvicoles complémentaires pour établir la régénération là où elle est insuffisante en contexte de coupe partielle.

8. Poursuite des travaux et suivi d'implantation du CFFM

Poursuite des travaux amorcés au CFFM

Les travaux des différentes équipes de travail ont mis en lumière la complexité des sujets traités. Afin de réaliser les mandats, certaines acquisitions de connaissances étaient nécessaires.

Ces étapes incontournables ont causé une réorganisation des plans de travail. Les échéances imposées par le cadre du CFFM ne nous ont pas permis de réaliser entièrement les mandats confiés. La poursuite des travaux nous apparaît donc essentielle pour répondre aux attentes des intervenants.

Chacune des équipes de travail a donc déterminé les travaux qui permettraient de répondre totalement aux besoins de connaissances identifiés. Les éléments retenus ont tous été énumérés dans la section « recommandation » de chacun des chapitres.

Nous recommandons aux autorités du MFFP de poursuivre les travaux amorcés par les différentes équipes de travail, et ce, en attribuant les budgets nécessaires et en libérant le personnel compétent. Le fonctionnement du CFFM s'est avéré très efficace et devrait être maintenu dans les circonstances.

Suivi d'implantation des recommandations du CFFM

Parmi les recommandations formulées par les différentes équipes de travail, certaines peuvent être mises en œuvre dès maintenant par les intervenants concernés. Cependant, l'équipe de travail sur l'implantation des recommandations du CIMOTFF a constaté les difficultés d'assurer une mise en œuvre cohérente des connaissances à connotations scientifiques dans chacun des contextes régionaux.

Afin de remédier à cette situation, le CFFM propose donc un tableau de bord permettant de guider les responsables provinciaux et régionaux de la mise en œuvre desdites recommandations. Le Tableau 24 présente les recommandations pouvant être mises en œuvre dans la prochaine année. Cependant, une équipe de travail affectée à l'implantation des recommandations devra élaborer des orientations d'implantation et un calendrier de réalisation.

Tableau 24 Suivi d’implantation des recommandations du CFFM

Thème CFFM	Recommandation		Activités ciblées / Responsables
	N°	Libellé	
Suivi d’implantation du CIMOTFF	1a	Transférer les nouvelles données et les nouvelles connaissances du CFFM auprès des utilisateurs en région.	Transfert de connaissance/CFFM
	1b	Effectuer un suivi de la mise en œuvre des recommandations du CFFM qui devrait avoir lieu dans les deux années suivant l’étape de transfert.	Suivi d’implantation/SOR
Modélisation du rendement des forêts envahies par le HEG dans le contexte de la MCH	2a	Utiliser le modèle de mortalité en présence de MCH intégré au modèle de croissance Artémis 2014 pour réaliser les courbes de rendement, lorsque la MCH est présente sur le territoire.	PAFIT/Aménagiste forestier
	2b	Utiliser la version 4.1.0 ou la plus récente du modèle Artémis 2014 (version 4.2.0) pour évaluer l’évolution de la surface terrière marchande. Cependant, le modèle de croissance SaMARE devrait être priorisé lorsque la qualité des arbres et leur répartition par produit sont des variables d’intérêt.	
	2c	Utiliser un seuil de 15 % de surface terrière marchande résiduelle et de 800 gaules ha ⁻¹ de HEG après coupe afin d’identifier les érablières à haut risque d’échec de régénération en ERS.	PAFIT/Aménagiste forestier, Diagnostic et prescription sylvicole/Sylviculteur
	2d	Utiliser le module de recrutement basé sur les gaules pour les simulations avec SaMARE lorsque l’on s’intéresse à la composition du recrutement dès qu’il sera disponible et que des données adéquates sur le dénombrement des gaules seront disponibles.	PAFIT/Aménagiste forestier
Évaluation et Mise à jour des matrices RPP	3a	Privilégier l’utilisation d’un modèle ou d’une matrice de RPP qui tient compte de la classe de qualité ABCD de l’arbre.	PAFIT/Aménagiste forestier
	3b	Planter et utiliser les nouveaux modèles et matrices de RPP régionalisés dans l’ensemble des outils du MFFP (MÉRIS, Capsis, DICA), principalement pour l’ERS dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune.	
Détermination des DMF des principales essences forestières de la zone tempérée nordique	4a	Former un comité chargé de proposer des orientations pour intégrer les connaissances sur la valeur unitaire nette (\$/m³) des arbres et sur les diamètres à maturité financière dans le contexte d’aménagement et de planification régionale (tactique et opérationnelle), tout en tenant compte des autres connaissances disponibles, des objectifs et des contraintes d’aménagement.	SOR-DAEF-DRF

Thème CFFM	Recommandation		Activités ciblées / Responsables
	N°	Libellé	
Rendement et production dans les érablières nordiques - Sapinière à bouleau jaune de l'ouest	5a	Prendre en considération la faible valeur de l'érable à sucre actuellement sur pied dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c dans le choix des scénarios et des investissements sylvicoles planifiés.	Diagnostic et prescription sylvicole/Sylviculteur
	5b	Intégrer la matrice régionalisée de répartition par produits de l'ERS pour les régions écologiques 4b et 4c dans les différents outils (MERIS, DICA, etc.) et processus utilisés dans l'organisation (MFFP).	PAFIT/Aménagiste forestier
	5c-i	Ajuster le DMF de l'ERS dans l'intervalle de 34 à 44 cm dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c selon les indicateurs forestiers, tout en prenant aussi soin de conserver suffisamment de semenciers de cette essence.	PAFIT/Aménagiste forestier, Diagnostic et prescription sylvicole/Sylviculteur
	5c-ii	Réaliser les scénarios sylvicoles au moment approprié dans les érablières des régions écologiques 4b et 4c afin de favoriser la production d'arbres plus jeunes.	
	5c-iii	Évaluer le potentiel de croissance du site afin de considérer le niveau de production attendu dans la détermination du scénario sylvicole retenu.	Diagnostic et prescription sylvicole/Sylviculteur
Objectifs de base de la sélection des arbres lors de la récolte des peuplements feuillus ou mixtes à dominance de feuillus	6a	Ajouter aux prochains PAFIT un tableau de bord régional d'indicateurs clés avec des cibles cohérentes avec les objectifs énoncés.	PAFIT/Aménagiste forestier
Balises d'application des traitements de coupes partielles dans les peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux	7a	Réaliser des inventaires de coefficient de distribution des gaules avec des microplacettes (4 m² de préférence) pour connaître l'état du renouvellement du peuplement lors du diagnostic sylvicole.	Diagnostic et prescription sylvicole/Sylviculteur

Annexe 1 : Critères de sélection, du nombre et de l'espacement des semenciers à conserver

Le choix des semenciers est généralement un enjeu dans la coupe progressive irrégulière à régénération lente (CPI-RL) en phase d'ensemencement, dans la coupe progressive régulière (CPR) en phase d'ensemencement ou dans la coupe avec réserve de semenciers (CRS).

Ces traitements sont normalement prescrits lorsque la régénération préétablie est jugée inadéquate et qu'on estime qu'il faudrait installer une nouvelle cohorte de régénération plus désirée à partir de semences.

Pour installer une abondante cohorte de régénération naturelle des essences à promouvoir, l'idéal est d'ouvrir minimalement le couvert pour satisfaire aux exigences lumineuses pour l'établissement de l'essence ciblée, sans toutefois stimuler la végétation concurrente pouvant croître plus rapidement que les essences à promouvoir (pour ces informations, voir Ministère des Ressources naturelles, 2013a), puis de conserver sur pied la densité la plus élevée possible de semenciers desdites essences, et ce, lors d'une bonne année semencière. Cependant, le contexte opérationnel permet rarement de respecter ces conditions idéales. En effet,

- la VF_{tot} est parfois près du coût d'approvisionnement (voir le chapitre 4), ce qui engendre une pression pour récolter un grand volume à l'hectare, dont une grande proportion en VF_{bo} est aussi présente dans les meilleurs arbres semenciers;
- la synchronisation des travaux de récolte, ou de la préparation de terrain, avec l'année semencière n'est pas toujours possible.

Par conséquent, le sylviculteur doit faire des compromis en ce qui concerne la qualité des individus sélectionnés (phénotype et DHP), ainsi que leur densité ou espacement.

1. Phénotype des semenciers

Le phénotype est l'ensemble des caractéristiques anatomiques et physiologiques développées par un arbre au cours de sa vie et qui résultent de l'interaction entre son patrimoine génétique et son environnement (Ministère des Ressources naturelles, 2013a). En sélectionnant les meilleurs phénotypes comme semenciers, nous savons que le meilleur patrimoine génétique est aussi sélectionné.

Toutefois, nous savons par expérience que l'environnement de croissance des arbres a un fort impact sur leur développement et que, par conséquent, une partie des moins beaux phénotypes (forme, blessures, etc.) pourrait quand même détenir un bon patrimoine génétique. D'ailleurs, une étude sur la régénération du bouleau jaune à partir de semenciers peu vigoureux a démontré à court terme le potentiel de ceux-ci à installer de la régénération (Gastaldello et autres, 2007). Cependant, il faudra attendre plusieurs années avant de savoir si cette régénération peut produire de bons phénotypes lorsqu'elle parviendra à maturité.

Nous proposons de sélectionner les semenciers, d'une essence donnée, de manière adaptée au traitement sylvicole de récolte, lequel est associé à un horizon de temps pour éventuellement récolter ou non les semenciers :

- **CPI-RL** : Les semenciers sont généralement destinés à être récoltés dans quelques décennies, comme dans 30 à 50 ans. Ainsi, la priorité de sélection des semenciers serait accordée aux arbres ayant un diamètre dans l'intervalle proposé au tableau 25 et qui sont aussi compris dans le CFC, lesquels ont les meilleures chances d'être disponibles lors de la prochaine récolte.
- **CPR et certaines CRS** : Les semenciers sont généralement destinés à être récoltés dans environ 10 ans. Ainsi, la priorité de sélection des semenciers sera effectuée selon un espacement régulier entre ceux-ci tout en priorisant les arbres ayant les plus gros DHP (forte taille). La survie à court terme des semenciers ne doit pas être risquée et la sélection doit se faire sans appliquer un ordre de priorité entre les classes S, C ou R.
- **CRS** : S'il est prévu d'abandonner indéfiniment les semenciers après la CRS, la priorité de sélection des semenciers pourrait être effectuée selon un espacement régulier entre ceux-ci. Ainsi, il n'y aurait pas de biais de sélection des phénotypes, évitant ainsi de risquer de dégrader la qualité moyenne du patrimoine génétique ou de trop réduire la qualité du prélèvement.

Dans les trois cas, il faut sélectionner comme semenciers des arbres ayant un houppier sain et de grande dimension, afin qu'ils puissent produire un maximum de semences.

2. DHP des semenciers

Les informations présentées concernant l'âge de début de la production régulière, l'âge de production optimale et le diamètre à maturité physiologique sont tirées du fichier de détail de l'information par essence produit dans le cadre des guides sylvicoles (Ministère des Ressources naturelles, 2013a, et Outil de comparaison des essences⁸). Les diamètres retenus ainsi que les diamètres des legs biologiques ont été fixés à l'aide des résultats obtenus pour les diamètres à maturité financière (voir le chapitre 4)

Le tableau 25 présente, par essence, les principales caractéristiques d'âges et de DHP recherchées pour sélectionner des semenciers.

3. Densité ou espacement des semenciers

Le nombre de semenciers suggérés à l'hectare par essence est tiré des guides sylvicoles du Québec et de l'Ontario (Ministère des Ressources naturelles, 2013ab; Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, 2015).

Selon les informations recensées au Tableau 25, l'examen plus approfondi de ces mêmes critères en fonction des végétations potentielles révèle que c'est surtout la régénération qui est problématique

⁸ <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/comparaison.php>

(Tableau 23). En moyenne, aucune végétation potentielle n'atteignait le critère minimal de 60 % de C.D. Les végétations potentielles à dominance résineuse MS1 et RS1 avaient moins de 40 % de C.D.

, une densité de 10 à 35 semenciers bien répartis à l'hectare serait généralement adéquate pour produire la quantité de semences requises pour l'établissement d'une régénération naturelle acceptable.

Notons qu'une densité minimale de 10 semenciers à l'hectare est plus appropriée pour des essences ayant des semences légères, comme le bouleau jaune, ou bien lorsqu'on dispose de semenciers de très forte taille et dotés d'un gros houppier. Cependant, ce seuil n'offre pas de marge pour des pertes opérationnelles ni pour l'erreur d'inventaire par échantillonnage. Il serait donc plus prudent de généralement viser à conserver au moins 20 à 25 semenciers bien répartis à l'hectare après la coupe, soit environ un arbre tous les 22 à 25 mètres, l'équivalent d'une hauteur d'arbre.

4. Essence des semenciers

En fonction des objectifs d'aménagement, il peut être souhaitable de viser une diversité d'essences des semenciers.

La priorité de la sélection des essences des semenciers devrait d'abord être accordée dans l'ordre décroissant suivant : essences à promouvoir, essences acceptables, essences à maîtriser. Notons que la liste des essences de chacune de ces catégories peut varier selon la station et le territoire (voir le PAFIT).

La rétention d'un semencier d'une **essence à maîtriser** devrait se faire seulement en CPI-RL ou en CPR afin de prévenir une trop grande ouverture localisée du couvert, et ce, en absence d'autres essences désirées.

Tableau 25 Âges de production de semences, diamètres à maturité physiologique, diamètres proposés pour les semenciers et les legs biologiques, ainsi que le nombre de semenciers suggérés à l'hectare par essence

Essences des semenciers	Âge de début production régulière	Âge de production optimale	Diamètre à maturité physiologique	Diamètre proposé ¹		Nombre de semenciers par ha
				Semencier	Legs ²	
Sapin baumier (SAB)	20 à 30 ans	Environ 25 ans	30 à 46 cm	Aucun		Aucun
Épinette blanche (EPB)	30 ans	45 à 60 ans	30 à 50 cm	24 à 34 cm	50cm +	10 à 35
Épinette rouge (EPR)	30 à 40 ans	Pas documenté	30 à 60 cm	24 à 34 cm	50 cm +	10 à 35
Épinette noire (EPN)	10 ans	50 à 150 ans	20 cm	24 à 34 cm	50 cm +	10 à 35
Pin rouge (PIR)	20 à 25 ans	50 à 150 ans	90 cm	24 à 50 cm	50 cm +	10 à 35
Pin blanc (PIB)	10 à 20 ans	50 à 150 ans	90 à 100 cm	24 à 60 cm	70 cm +	10 à 35
Pin gris (PIG)	3 à 15 ans	70 à 80 ans	20 à 25 cm	18 à 34 cm	50 cm +	10 à 35
Mélèze laricin (MEL)	4 à 15 ans	75 ans	36 à 51 cm	18 +		
Pruche du Canada (PRU)	20 à 40 ans	Prod. ↑ fct âge	89 à 102 cm	24 à 60 cm	60 cm +	10 à 35
Thuya occidental (THO)	20 à 30 ans	75 ans	30 à 60 cm	24 à 50 cm	50 cm +	10 à 35
Peuplier faux-tremble (PET)	0 à 20 ans	50 à 70 ans	25 à 30 cm	Aucun	60 cm +	Aucun
Peuplier à grandes dents (PEG)	10 à 20 ans	Pas documenté	20 à 30 cm	Aucun	60 cm +	Aucun
Bouleau à papier (BOP)	15 ans	40 à 70 ans	45 à 60 cm	Aucun	50 cm +	Aucun
Bouleau jaune (BOJ)	40 ans	> 70 ans	60 cm	30 à 44 cm	66 cm +	3 à 10
Érable à sucre (ERS)	22 à 30 ans	70 à 100 ans	60 à 90 cm	30 à 44 cm	66 cm +	10 à 35
Chêne rouge (CHR)	25 ans	50 ans ou plus	30 à 90 cm	30 à 50 cm	66 cm +	10 à 35

¹ Les arbres d'un DHP inférieur au DMF sont priorités; à ajuster selon l'essence et la région. Les valeurs de cette colonne sont celles en discussion pour la région de l'Outaouais.² Les valeurs de cette colonne sont celles en discussion pour la région de l'Outaouais.

Sources : Ministère des Ressources naturelles ,2013ab; Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, 2015.

Annexe 2 : Sigles, essences forestières, traitements sylvicoles et variantes, végétations potentielles et régions écologiques

LISTE DES SIGLES	
ABCD	Sigle de la classification des tiges d'essences feuillues, soit les classes A, B, C et D ainsi que les classes regroupées AB et CD
APC	Après la coupe
AVC	Avant la coupe
BFEC	Bureau du Forestier en chef
BjR	Peuplements mixtes de bouleau jaune et de résineux
BM	Branches marchandes
BMMB	Bureau de mise en marché des bois
C. D.	Coefficient de distribution
CIMOTFF	Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue
DAEF	Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers
DCC	Direction de la certification des processus forestiers et contrôles
CFC	Capital forestier en croissance
CFFM	Chantier sur les forêts feuillues et mixtes
DGFo	Direction générale Forêt
DGSMS – DG	Direction générale secteur métropolitain et sud – Direction générale
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (1,3 m du sol)
DMF	Diamètre à maturité financière
DRF	Direction de la recherche forestière
EFVbo	Évolution de la valeur en bois d'œuvre
F1	Meilleur grade de qualité d'une bille de sciage conventionnel (bois de feuillu)

LISTE DES SIGLES

F2	Second grade de qualité d'une bille de sciage conventionnel (bois de feuillu)
F3	Dernier grade de qualité d'une bille de sciage conventionnel (bois de feuillu)
F4	Grade de qualité d'une bille de sciage non conventionnel, ou de billon, (bois de feuillu)
DF1F2	Ensemble des billes de grande valeur de bois feuillu, soit celles de déroulage (D) et des grades F1 et F2
DF1F2F3	Ensemble des billes de bois d'œuvre feuillu conventionnel, soit celles de déroulage (D) et des grades F1, F2 et F3
MCH	Maladie corticale du hêtre
MERCJ	Mesure des effets réels de la coupe de jardinage
MÉRIS	Modèle d'évaluation de la rentabilité des investissements sylvicoles
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MSCR	Sigle de la classification des tiges – Défauts et carie des arbres, soit les classes M, S, C ou R ainsi que les groupes MS ou CR
NU	Bois non utilisé correspondant aux résidus de tronçonnage jugés inaptes à la transformation
OP	Sigle de la classification de l'utilisation des arbres pour le bois d'œuvre ou la pâte
PAFIT	Plan d'aménagement forestier intégré tactique
PEP	Placettes-échantillons permanentes
REEF	Réseau d'experts en économie forestière
RPP	Répartition par produits
SOR	Secteur des opérations régionales
ST	Surface terrière
TYF	Types de forêts
UC	Unité de compilation
VFbo	Valeur financière en bois d'œuvre
VFtot	Valeur financière totale
01-DGFO	Direction de la gestion des forêts Bas-Saint-Laurent

LISTE DES SIGLES

03-DG Fo	Direction de la gestion des forêts Capitale-Nationale
04-DG Fo	Direction de la gestion des forêts Mauricie–Centre-du-Québec
07-DG Fo	Direction de la gestion des forêts Outaouais
14-15-DG Fo	Direction de la gestion des forêts Lanaudière–Laurentides

LISTE DES ESSENCES FORESTIÈRES

AUF	Autres essences feuillues
BOJ	Bouleau jaune
BOP	Bouleau à papier
CET	Cerisier tardif
CHR	Chêne rouge
EPB	Épinette blanche
EPN	Épinette noire
EPR	Épinette rouge
ERS	Érable à sucre
ERR	Érable rouge
HEG	Hêtre à grandes feuilles
MEL	Mélèze laricin
PEG	Peuplier à grandes dents
PET	Peuplier faux-tremble
PIB	Pin blanc
PIG	Pin gris
PIR	Pin rouge
PRU	Pruche du Canada
RES	Essences résineuses

LISTE DES ESSENCES FORESTIÈRES

SAB	Sapin baumier
THO	Thuya occidental
TIL	Tilleul d'Amérique
BOJ	Bouleau jaune
BOP	Bouleau à papier
CET	Cerisier tardif
CHR	Chêne rouge
EPB	Épinette blanche
EPN	Épinette noire
EPR	Épinette rouge

LISTE DES TRAITEMENTS SYLVICOLES ET VARIANTES

CJ	Coupe de jardinage
CPI	Coupe progressive irrégulière
CPI-CP	Coupe progressive irrégulière à couvert permanent
CPI-CP ens.	Coupe progressive irrégulière à couvert permanent en phase d'ensemencement
CPI-RL	Coupe progressive à régénération lente
CPI-RL ens.	Coupe progressive irrégulière à régénération lente en phase d'ensemencement
CPR	Coupe progressive régulière
CPR ens.	Coupe progressive régulière en phase d'ensemencement
CRS	Coupe avec réserve de semenciers

LISTE DES VÉGÉTATIONS POTENTIELLES

FC1	Chênaie rouge
FE1	Érablière à caryer cordiforme
FE2	Érablière à tilleul
FE3	Érablière à bouleau jaune
FE4	Érablière à bouleau jaune et hêtre
FE5	Érablière à ostryer
FE6	Érablière à chêne rouge
MJ1	Bétulaie jaune à sapin et à érable à sucre
MJ2	Bétulaie jaune à sapin
MS1	Sapinière à bouleau jaune
MS2	Sapinière à bouleau blanc
RP1	Pinède blanche ou rouge
RS1	Sapinière à thuya
RT1	Prucheraie

Régions écologiques du Québec

Zone tempérée nordique

Sous-zone de la forêt décidue

1a	Plaine du bas Outaouais et de l'archipel de Montréal
2a	Collines de la basse Gatineau
2b	Plaine du Saint-Laurent
2c	Coteaux de l'Estrie
3a	Collines de l'Outaouais et du Témiscamingue
3b	Collines du lac Nominique
3c	Hautes collines du bas Saint-Maurice
3d	Coteaux des basses Appalaches

Régions écologiques du Québec

Sous-zone de la forêt mixte

4a	Plaines et coteaux du lac Simard
4b	Coteaux du réservoir Cabonga
4c	Collines du moyen Saint-Maurice
4d	Hautes collines de Charlevoix et du Saguenay
4e	Plaine du lac Saint-Jean et du Saguenay
4f	Collines des moyennes Appalaches
4g	Côte de la baie des Chaleurs
4h	Côte gaspésienne

Zone boréale

Sous-zone de la forêt boréale fermée

5a	Plaine de l'Abitibi
5b	Coteaux du réservoir Gouin
5c	Collines du haut Saint-Maurice
5d	Collines ceinturant le lac Saint-Jean
5e	Massif du lac Jacques-Cartier
5f	Massif du mont Valin
5g	Hautes collines de Baie-Comeau–Sept-Îles
5h	Massif gaspésien
5i	Haut massif gaspésien
5j	Île d'Anticosti
5k	Îles de la Madeleine
6a	Plaine du lac Matagami
6b	Plaine de la baie de Rupert
6c	Plaine du lac Opémisca
6d	Coteaux du lac Assinica
6e	Coteaux de la rivière Nestaocano

Régions écologiques du Québec	
6f	Coteaux du lac Mistassini
6g	Coteaux du lac Manouane
6h	Collines du lac Péribonka
6i	Hautes collines du réservoir Outardes
6j	Hautes collines du lac Cacaoui
6k	Coteau de la rivière à la Croix et du lac au Griffon
6l	Collines du lac Grand Mesnil
6m	Collines de Havre-Saint-Pierre et de Blanc-Sablon
6n	Collines du lac Musquaro
6o	Coteaux du lac Fonteneau
6p	Coteaux du lac Caopacho
6q	Coteaux des lacs Matonipi et Jonquet
6r	Massif des monts Groulx
6p	Coteaux du lac Caopacho

Bibliographie

- AUGER, I., H. POWER, F. HAVRELJUK et C. WARD (2019). *Capsis, une plateforme pour l'utilisation des modèles de croissance forestière*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis de recherche forestière n° 138, 2 p.
- ARBOGAST, J.C. (1957). *Marking guides for northern hardwoods under the selection system*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Lake States For. Exp. Stn. Saint Paul, Minn., 20 p.
- BÉDARD, S. et J. DEBLOIS (2010). *Effets de trouées sylvicoles sur l'établissement de la régénération d'une érablière à bouleau jaune après cinq ans*, Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 159, 27 p.
- BÉDARD, S., BILODEAU-GAUTHIER, S., F. GUILLEMETTE et M.-E. ROY (2021). *La régénération du bouleau jaune à l'aide de trouées et de parquets réalisés de façon opérationnelle – Partie 1 : Évaluation des effets escomptés*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis de recherche forestière n° 160, 2 p.
- BÉDARD S., P. RAYMOND et J. DEBLOIS. *Northern hardwood stand regeneration dynamics 10 years after irregular shelterwood and mechanical control of understory beech*. [En préparation].
- BILODEAU-GAUTHIER, S., H. POWER, F. GUILLEMETTE, S. BÉDARD (2021a). *Solutions pour mieux simuler l'évolution des peuplements situés sur la végétation potentielle de l'érablière à bouleau jaune dans un contexte d'envahissement par le hêtre*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique n° SSRF-24, 26 p.
- BILODEAU-GAUTHIER, S., F. GUILLEMETTE, S. BÉDARD, H. POWER (2021b). *Combien de hêtres pouvons-nous tolérer sur pied après une coupe partielle sans compromettre la régénération en essence désirée*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique n° SSRF-26, 13 p.
- BLAIS, L. (2014). *Simplifions la statistique – De quoi la taille d'un échantillon dépend-elle?*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 4 p.

- BOILEAU, E. et F. GUILLEMETTE (2020). *Bilan 2020 de la mise en œuvre des recommandations du CIMOTFF*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestier, 23 p.
- BOULET, B. et G. LANDRY (2015). *Carie des arbres, Fondements, diagnostic et applications*, 3^e édition, Les Publications du Québec, Québec, 347 p.
- BUREAU DE MISE EN MARCHÉ DES BOIS (2021a). *Modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles (MÉRIS)*, [En ligne], Gouvernement du Québec, Bureau de mise en marché des bois.
- BUREAU DE MISE EN MARCHÉ DES BOIS (2021b). *Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État – Exercice 2021-2022*, [En ligne], Gouvernement du Québec, Bureau de mise en marché des bois.
- DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE (2017). *Expansion du hêtre à grandes feuilles et déclin de l'érable à sucre au Québec : portrait de la situation, défis et pistes de solution*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis scientifique, 146 p.
- FORTIN, M., F., GUILLEMETTE et S. BÉDARD (2009). « Predicting volumes by log grades in standing sugar maple and yellow birch trees in southern Quebec », *Canada, Can. J. For. Res.*, vol. 39, n° 10, p. 1928-1938.
- GASTALDELLO, P., J.-C. RUEL et J.-M. LUSSIER (2007). « Remise en production des bétulaies jaunes résineuses dégradées : étude du succès d'installation de la régénération », *The Forestry chronicle*, vol. 83, n° 5, p. 742-753.
- GERMAIN, R.H., R.D. YANAI, A.K. MISHLER, Y. Yang et B.B. Park (2015). « Landscape and individual tree predictors of dark heart size in sugar maple », *J. For.*, vol. 113, n° 1, p. 20-29.
- GODMAN, R.M. et D.J. BOOKS (1971). *Influence of stand density on stem quality in pole-size northern hardwoods*, USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Research Paper NC-54, 7 p.
- GROUPE DDM (2021). *Enquête sur les coûts d'opération forestière dans les forêts du domaine de l'État ainsi que sur les coûts et revenus de l'industrie du sciage du Québec 2019*, Rapport présenté au ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 23 p et annexes.
- GUILLEMETTE, F. (2016). *Diamètres à maturité pour l'érable à sucre et le bouleau jaune au Québec*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Note de recherche forestière n° 145, 14 p.

- GUILLEMETTE, F. (2018). *Suivi de la mise en œuvre des actions pour l'application des recommandations du Vérificateur général du Québec. Action 36, rapport 2, partie 1. Portrait des traitements sylvicoles pratiqués en peuplements à dominance de feuillus nobles*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, rapport interne n° 501, 9 p.
- GUILLEMETTE, F. (2019). « Identifier les arbres les plus susceptibles de mourir après une coupe partielle dans l'érablière ou la bétulaie jaune », *For. Chron.*, vol. 95, n° 1, p. 6-10.
- GUILLEMETTE, F. (2020). *Évaluation du biais des modèles et des matrices de répartition par produits*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique SSRF-21, 12 p.
- GUILLEMETTE, F. et S. BÉDARD (2019). *L'érable à sucre produit-il des arbres de meilleure qualité à la limite nord de son aire de distribution?*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis de recherche n° 124 2 p.
- GUILLEMETTE, F. et F. HAVRELJUK. *At Which Diameter Does Sugar Maple Reach Financial Maturity at the Northern Edge of its Range?*, Accepté le 30 octobre 2021 pour publication dans le résumé de la conférence Northern Hardwood Conference 2021 tenue en ligne les 15 et 16 juin 2021. [Sous presse].
- GUILLEMETTE, F., M.-M. GAUTHIER, M.-C. LAMBERT et S. BÉDARD (2013). *Effets réels décennaux des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel*, Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 168, 34 p.
- GUILLEMETTE, F., H. POWER et S. BÉDARD (2020). *Effets appréhendés de la maladie corticale du hêtre à l'échelle du calcul des possibilités forestières 2023-2028*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique n° SSRF-20, 16 p.
- GUILLEMETTE, F., F. HAVRELJUK et S. BÉDARD (2021). *Qualité de l'érable à sucre dans l'unité d'aménagement 064-71*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique SSRF-22, 22 p.
- GUILLEMETTE, F. et autres. *Analyse financière des essences forestières du sud du Québec*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Projet de mémoire de recherche forestière. [En préparation a].
- GUILLEMETTE, F., F. Havreljuk, H. Power et S. Bédard. *Rendements observés et simulés 20 ans après des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel*,

Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. [En préparation b].

GUILLEMETTE, F., LAMBERT, M.-C., POWER, H. et P. RAYMOND. *Évaluation du nombre de placettes requises pour rencontrer une marge d'erreur donnée lors de l'inventaire des gaules en forêt tempérée*. [En préparation c].

HAVRELJUK, F., A. ACHIM et D. POTHIER (2013). « Regional variation in the proportion of red heartwood in sugar maple and yellow birch », *Canadian Journal Forest Research*, vol. 43, n° 3, p. 278-287.

HAVRELJUK, F., S. BÉDARD, F. GUILLEMETTE et J. DEBLOIS (2015a). *Predicting log grade volumes in northern hardwood stands of southern Quebec*, ISCHP 2015: 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing, 15 au 17 septembre 2015, Québec, p. 107-114.

HAVRELJUK, F., F. LABBÉ, G. ST-HILAIRE et R. YOUSFI (2015b). *Échantillonnage d'arbres visant à bonifier les modèles et les matrices de répartition par produits des espèces feuillues – Méthode et rapport de réalisation*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique SSRF-8, 35 p.

HAVRELJUK, F. et autres. *Modèles de répartition par produits régionalisés*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. [Note de recherche forestière en préparation].

LEAK, W.B., M. YAMASAKI et R. HOLLERAN (2014). *Silvicultural Guide for Northern Hardwoods in the Northeast*. U.S.D.A, Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA, p. 1-46 (46).

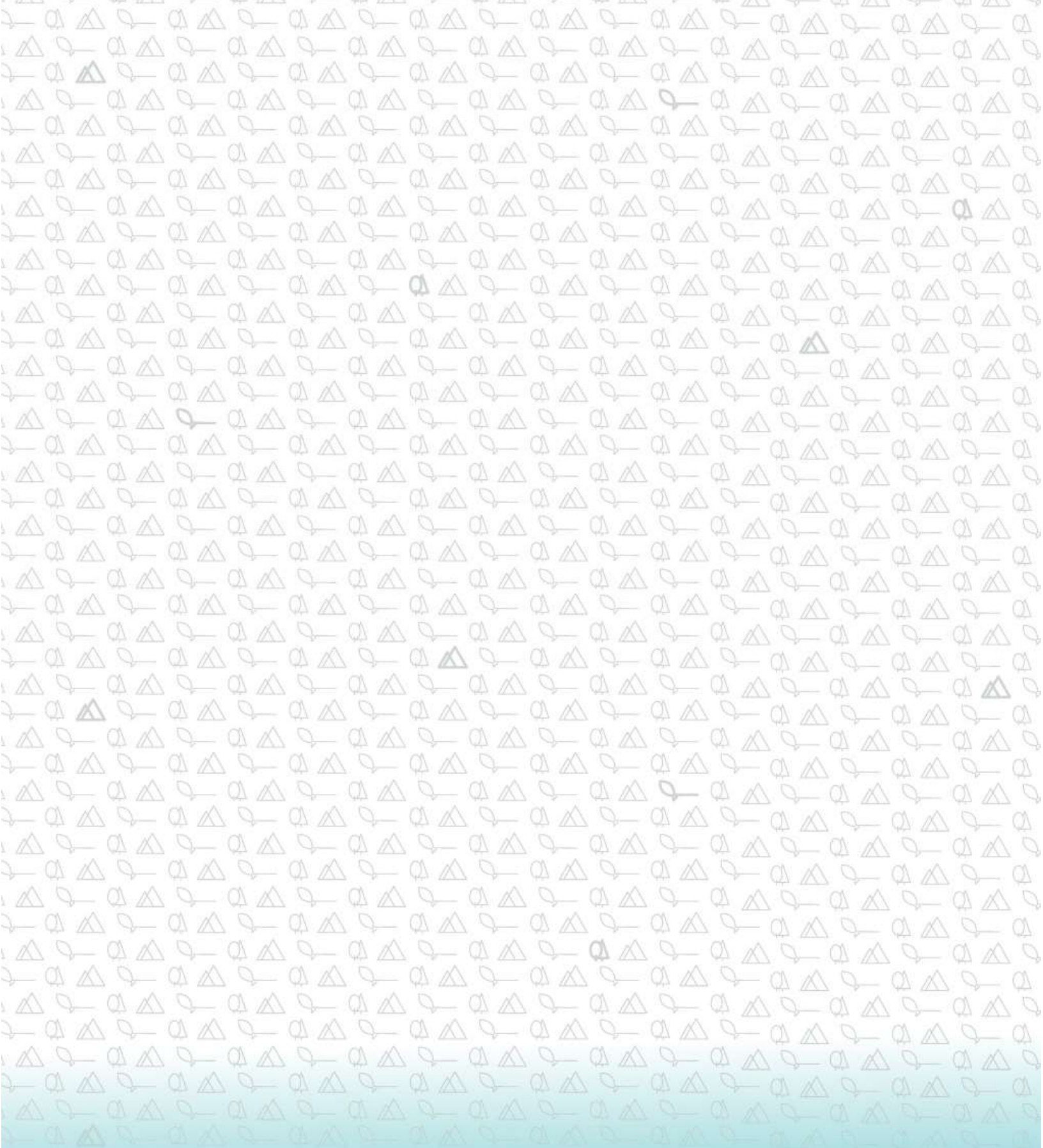
MAJCEN, Z., Y. RICHARD, M. MÉNARD et Y. GRENIER (1990). *Choix des tiges à marquer pour le jardinage d'érablières inéquiennes : Guide technique*, Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts), Direction de la recherche et du développement, Mémoire n° 96, 96 p.

MINISTÈRE des RESSOURCES NATURELLES (2013a). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1. Les fondements biologiques de la sylviculture*, ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot, Les Publications du Québec, 1044 p.

MINISTÈRE des RESSOURCES NATURELLES (2013b). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture*, ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier, Les Publications du Québec, 744 p.

- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2014). *Guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier*, Québec, Gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 237 p.
- MINISTÈRE des FORÊTS, de la FAUNE et des PARCS (2021). *Classification des tiges d'essences feuillues – Normes techniques*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Secteur des forêts), Direction des inventaires forestiers, 92 p.
- NATIONAL HARDWOOD LUMBER ASSOCIATION (2007). *Rules for the measurement and inspection of hardwood and cypress*, Memphis, TN, National Hardwood Lumber Association, 136 p.
- NOLET, P., S. BÉDARD, P. ROCHON, D. BLOUIN et S. DELAGRANGE (2020). *Importance relative des traitements sylvicoles, du cerf de Virginie, de la compétition et des facteurs abiotiques sur la réponse à moyen terme de la régénération et la diversité végétale en forêt tempérée (feuillue et mixte)*, Institut des sciences de la forêt tempérée et Université du Québec en Outaouais, rapport présenté au ministère des Forêts, de la faune et des Parcs, 36 p.
- ONTARIO MINISTRY of NATURAL RESOURCES and FORESTRY (2015). *Forest Management Guide to Silviculture in the Great Lakes-St. Lawrence and Boreal Forests of Ontario*, Queens Printer for Ontario: Toronto, On., 394 p.
- PETRO, F.J. et W.W. CALVERT (1976). *La classification des billes de bois franc destinées au sciage*, Forestry Technical Report 6F, NRCAN. Can. For. Serv., Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Forintek Canada Corp., Ottawa, Ontario.
- POWER, H., P. RAYMOND, S. BÉDARD, E. DUCHATEAU et M. RUEL. *A spatial explicit growth model for mixed yellow birch-conifer stands*. [En préparation a].
- POWER, H., P. RAYMOND, S. BÉDARD et F. GUILLEMETTE. *Évaluation du cycle de coupe pour les bétulaies jaunes résineuses*. [En préparation b].
- POWER, H., P. RAYMOND, M. PRÉVOST, V. ROY et F. BERNINGER (2019). « Basal area and diameter growth in high-graded eastern temperate mixedwood forests: the influence of acceptable growing stock, species, competition and climate », *Forestry: An International Journal of Forest Research* 92:659-669.
- POWER, H. (2021). *Artémis 2014 v.4.2.0, une nouvelle version du modèle de croissance*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique SSRF-27, 15 p.
- Power, H., I. Auger, P. Raymond, F. Guillemette et D. Dumais (2022). « Sapling growth dynamics after partial cutting in temperate mixedwood stands ». *Canadian Journal of Forest Research* 52: 1186–1200

- PRÉVOST, M. et L. CHARRETTE (2019). « Rehabilitation silviculture in a high-graded temperate mixedwood stand in Quebec, Canada », *New Forests*, vol. 50, n° 4, p. 677-698.
- RAYMOND, P., A. A. ROYO, M. PREVOST et D. DUMAIS (2018). « Assessing the single-tree and small group selection cutting system as intermediate disturbance to promote regeneration and diversity in temperate mixedwood stands », *Forest Ecology and Management* 430:21-32.
- RAYMOND, P., M. PRÉVOST et V. ROY (2020). *Options sylvicoles pour réhabiliter les bétulaies jaunes résineuses dégradées*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis de recherche forestière n° 151, 2 p.
- RAYMOND, P., H. POWER, F. GUILLEMETTE, J. DEBLOIS, D. DUMAIS, M. PREVOST et V. ROY. *Rehabilitation silviculture: restoring functionality in uneven-aged high graded mixedwood stands*. [En préparation].
- RIJAL, B., H. POWER, I. AUGER, F. GUILLEMETTE, S. BÉDARD et R. SCHNEIDER, « Development of tree recruitment models for 10 species groups in the sugar maple-dominated mixed forests of eastern Canada ». [Soumis à *Can. J. For. Res.* le 15 avril 2022].
- SAUCIER, J.-P., F. GUILLEMETTE, P. GAUTHIER, J. GRAVEL, F. LABBÉ, S. MEUNIER et N. VACHON (2014). *Rapport du Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue (CIMOTFF)*, Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Rapport technique, 98 p. et annexes.
- SAUCIER, J.-P., F. GUILLEMETTE, S. MEUNIER, F. BOUCHER, D. PÎN, S. CROSNIER-PICHETTE, A. PATRY, J.-M. LABBÉ et M. AUGER (2021). *Rapport final du Sous-groupe de travail sur les prescriptions en forêt feuillue*, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, 97 p.
- THOM, D., ET W.S. KEETON (2019). « Stand structure drives disparities in carbon storage in northern hardwood-conifer forests », *Forest Ecology and Management* 442:10-20.
- THOM, D., A.R. TAYLOR, R. SEIDL, W. THUILLER, J. WANG, M. ROBIDEAU et W.S. KEETON (2021). « Forest structure, not climate, is the primary driver of functional diversity in northeastern North America », *Science of the Total Environment* 762:143070.
- VOYER, D. et autres. *La qualité des arbres dans les érablières nordiques*, Mémoire de maîtrise, Université Laval. [En préparation].



**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 