Mémoire de recherche forestière nº 191
Direction de la recherche forestière

# Maturité financière, revenu potentiel et vulnérabilité des essences de la zone tempérée nordique

par François Guillemette et Luca Gabriel Serban

Votre gouvernement

Québec

Mémoire de recherche forestière n° 191
Direction de la recherche forestière

# Maturité financière, revenu potentiel et vulnérabilité des essences de la zone tempérée nordique

par François Guillemette, ing.f., M. Sc.
et Luca Gabriel Serban, ing.f., Ph. D.

Auteur de correspondance : francois.guillemette@mrnf.gouv.qc.ca

© Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
2024

# Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle acquiert de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou à leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

# Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par au moins trois pairs indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document est disponible dans le site Internet du ministère des Ressources naturelles et des Forêts : https://mffp.gouv.qc.ca/le-ministere/publications/.

Pour obtenir des renseignements complémentaires, veuillez vous adresser à :

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca
Internet : https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/forets/recherche-connaissances/recherche-forestiere-gouvernementale

© Gouvernement du Québec
On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Guillemette, F. et L. G. Serban, 2024. *Maturité financière, revenu potentiel et vulnérabilité des essences de la zone tempérée nordique*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 191. 55 p. https://www.mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/MRF191.pdf

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et des Forêts sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISSN : 1183-3912
ISBN (PDF) : 978-2-550-97557-1
G.F.D.C. : 651.74--064 (714)
L.C. : SD393 SD397.H3 SB608.H3

# Notes biographiques

**François Guillemette** est ingénieur forestier diplômé de l'Université Laval (B. Sc., 2001, et M. Sc., 2002). De 2001 à 2002, il est conseiller en gestion intégrée des ressources à la Fédération des pourvoyeurs en chasse et pêche du Québec. De 2002 à 2005, il travaille au Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Ses travaux de recherche portent alors principalement sur la sylviculture et le rendement des forêts de feuillus ou de pins blancs. Depuis 2005, il est chercheur en sylviculture des feuillus à la Direction de la recherche forestière. Ses travaux traitent surtout de la dynamique des peuplements de feuillus après coupe partielle. Il s'intéresse avant tout aux jeunes peuplements de feuillus, aux différents systèmes de classement des arbres feuillus sur pied (qualité, vigueur, risque de mortalité) et à la modélisation de la croissance (le modèle SaMARE). Il étudie également la notion de diamètre à maturité des arbres feuillus.

**Luca Gabriel Serban** est ingénieur forestier, diplômé en 2001 de l'Université Transilvania de Brasov, en Roumanie. Il travaille comme ingénieur forestier en Roumanie de 2001 à 2016. En 2012, il obtient un doctorat en foresterie de l'Université Transilvania après avoir étudié la valorisation du bois issu des plantations forestières. Depuis son arrivée au Québec en 2016, il poursuit une maîtrise à l'Université Laval. Il devient membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec en 2019 après avoir fait reconnaître ses acquis. Il entre à la Direction de la recherche forestière en 2018 comme stagiaire dans le créneau des plantations, développe une expertise sur l'étude de la rentabilité financière des plantations résineuses et y devient chercheur en sylviculture des plantations forestières en 2019. Ses travaux portent sur le rendement, l'effet des traitements sylvicoles et la rentabilité financière et économique des plantations forestières. Il étudie aussi la productivité de la machinerie forestière et du travail forestier.

# Résumé

Un défi dans la réalisation des coupes partielles pour approvisionner une usine de bois d'œuvre de feuillus est de tirer un revenu suffisant à partir des bois récoltés pour couvrir les coûts d'approvisionnement. Historiquement, la majeure partie du volume des peuplements à dominance de feuillus est composée de bois utilisés pour les pâtes et papiers. Toutefois, depuis le milieu de la décennie 2000, les marchés pour ces produits sont en décroissance. Il en résulte une pression à récolter en plus forte proportion les plus gros arbres de belle qualité des essences feuillues les plus recherchées par les usines de bois d'œuvre. Dans ce contexte, nous avons analysé le revenu potentiel que pouvaient offrir 15 essences forestières rencontrées dans les peuplements où des coupes partielles sont couramment pratiquées dans le sud du Québec. Nous avons aussi calculé le diamètre à maturité financière (DMF) de ces essences, soit celui à partir duquel le taux de rendement annuel des arbres laissés sur pied devient négatif à cause de leurs grands risques de mortalité ou de dégradation, comparativement à leur accroissement.

Les résultats ont permis d'identifier 4 essences pouvant offrir un revenu bien plus grand que le coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle (le chêne rouge [*Quercus rubra* L.], l'épinette blanche [*Picea glauca* (Moench) Voss], l'épinette rouge [*Picea rubens* Sarg.] et le pin blanc [*Pinus strobus* L.]), de même que 4 autres dans la situation opposée (le bouleau à papier [*Betula papyrifera* Marshall], l'érable rouge [*Acer rubrum* L.], le tilleul d'Amérique [*Tilia americana* L.] et la pruche du Canada [*Tsuga canadensis* (L.) Carrière]). Les résultats démontrent aussi que le taux annuel de rendement d'un arbre au Québec (c'est-à-dire son taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre) dépasse rarement la valeur de 3,5 % recommandée pour des investissements publics.

Pour compléter cette analyse financière, nous avons recensé la littérature afin d'évaluer la vulnérabilité aux changements climatiques anticipés et les répercussions potentielles causées par l'arrivée de nouveaux ravageurs exotiques de ces 15 essences et de 9 autres de la zone tempérée nordique. Ces nouvelles menaces pourraient influencer les perspectives à long terme quant à l'utilisation des résultats financiers.

Mots-clés : bouleau jaune, coupe partielle, diamètre à maturité financière, érable à sucre, essences feuillues, valeur

# *Abstract*

*One of the challenges when conducting partial cuts to supply a hardwood lumber mill is to generate sufficient income from the harvested wood to cover the supply costs. In the past, most of the volume from hardwood-dominated stands was made up of wood that was used for pulp and paper, but since the mid-2000s, markets for these products have been declining. As a result, there is pressure to harvest a greater proportion of the larger, higher-quality trees of the hardwood species that are most in demand by lumber mills. In this context, we analyzed the income potential of 15 species found in stands where partial cutting is commonly practiced in southern Québec. We also calculated the diameter at financial maturity of these species, i.e., the diameter at which the annual rate of return of trees left standing becomes negative due to their high risk of mortality or degradation, compared with their growth.*

*Our results identified 4 species that could offer a return well above the average cost of supply from a partial cut (red oak [*Quercus rubra *L.], white spruce [*Picea glauca *(Moench) Voss], red spruce [*Picea rubens *Sarg.] and white pine [*Pinus strobus *L.]), as well as 4 others in the opposite situation (paper birch [*Betula papyrifera *Marshall], red maple [*Acer rubrum *L.], basswood [*Tilia americana *L.] and eastern hemlock [*Tsuga canadensis *(L.) Carrière]). Results also show that the annual rate of return on a tree rarely exceeds 3.5%, namely the recommended value for public investments.*

*To complete this financial analysis, we reviewed the literature to assess the vulnerability to anticipated climate change and the potential repercussions caused by the arrival of new exotic pests for these 15 species, as well as for 9 others from the northern temperate zone. These new threats could influence long-term perspectives regarding the use of financial results.*

*Keywords: diameter at financial maturity, hardwood species, partial cut, mixedwood forest subzone, northern hardwood forest, value*

# Table des matières

**Résumé** ..... **v**

***Abstract*** ..... **vi**

**Liste des tableaux** ..... **ix**

**Liste des figures** ..... **ix**

**Liste des abréviations et définition de certains termes utilisés dans cet ouvrage** ..... **xi**

**Remerciements** ..... **xiii**

**Introduction** ..... **1**

**Chapitre 1 — Matériel et méthodes** ..... **5**
- 1.1 Données ..... 5
- 1.2 Traitement des données ..... 6
- 1.3 Analyses statistiques ..... 9
- 1.4 Interprétation du diamètre à maturité financière ..... 9
- 1.5 Analyse de sensibilité ..... 9
- 1.6 Vulnérabilité des essences aux changements anticipés ..... 10

**Chapitre 2 — Résultats** ..... **13**
- 2.1 Bouleau jaune ..... 13
- 2.2 Érable à sucre ..... 17
- 2.3 Autres essences feuillues ..... 21
- 2.4 Essences résineuses ..... 22
- 2.5 Analyse de sensibilité ..... 26
- 2.6 Vulnérabilité des essences aux changements anticipés ..... 27

**Chapitre 3 — Discussion** ..... **33**
- 3.1 Essences générant des revenus élevés ..... 34
- 3.2 Essences générant de faibles revenus ..... 36
- 3.3 Essences générant des revenus modérés ..... 37
- 3.4 Diamètre à maturité financière à 30 ans ..... 42

**Conclusion et implications pour l'aménagement** ..... **43**

**Références bibliographiques** ..... **45**

**Annexe** ..... **51**

# Liste des tableaux

**Tableau 1.** Description sommaire des réseaux de placettes-échantillons à l'étude ..... 5

**Tableau 2.** Revenus tendance (en $ canadiens de 2018/m$^3$) des produits de bois par essence ..... 8

**Tableau 3.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalle de confiance [IC]) pour le bois d'œuvre de bouleau jaune, selon le groupe de régions écologiques et les classes de qualité des arbres : valeurs observées sur une période moyenne de 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté ..... 15

**Tableau 4.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre d'érable à sucre, selon le groupe de régions écologiques et la classe de qualité des arbres : valeurs observées sur une période moyenne de 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté ..... 20

**Tableau 5.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de 7 essences feuillues : valeurs observées sur une période moyenne d'environ 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté ..... 23

**Tableau 6.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalles de confiance) pour le bois d'œuvre des essences résineuses : valeurs observées sur une période moyenne d'environ 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté ..... 25

**Tableau 7.** Évaluation selon Périé *et al.* (2014) des changements attendus de l'habitat actuel d'ici la fin du siècle en cours pour 24 essences de la zone tempérée nordique, sous le scénario RCP 8.5, cohérence de ces changements attendus avec l'étude de Prasad *et al.* (2020), capacité à résister à la sécheresse (adapté de Boisvert-Marsh *et al.* 2020) et degré de vulnérabilité aux ravageurs exotiques présents ou susceptibles de s'introduire (adapté de l'annexe) ..... 29

**Tableau A1.** Description sommaire des principaux ravageurs exotiques susceptibles de perturber la zone tempérée nordique au Québec ..... 51

# Liste des figures

**Figure 1.** Carte de la répartition des placettes-échantillons utilisés dans la présente étude selon leur réseau, la région écologique et le regroupement de celles-ci ..... 6

**Figure 2.** Schéma illustrant le calcul du changement annuel de revenu pour un arbre feuillu, selon ses caractéristiques initiales et celles observées à la fin de la période de croissance ..... 7

**Figure 3.** Volumes moyens par catégorie de produits en fonction du DHP pour le bouleau jaune au Québec ..... 13

**Figure 4.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour le bouleau jaune, selon la classe de qualité de l'arbre (AB, C ou D) et la région écologique (3a et 3b, 3c et 3d, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk *et al.*, soumis) ..... 14

**Figure 5.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour le bouleau jaune, selon la classe de priorité de récolte (CR, S ou M), la région écologique (3a et 3b, 3c et 3d, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk *et al.*, soumis) ..... 14

**Figure 6.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour le bouleau jaune de classe CR, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques ..... 15

**Figure 7.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour le bouleau jaune de classe M ou S, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) ..... 16

**Figure 8.** Volumes moyens par catégorie de produits en fonction du DHP pour l'érable à sucre au Québec ..... 17

**Figure 9.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour l'érable à sucre, selon la classe de qualité de l'arbre (AB, C ou D) et la région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk *et al.*, soumis) ..... 18

**Figure 10.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour l'érable à sucre, selon la classe de priorité de récolte (CR, S ou M), la région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk et al., soumis) et le DHP ..... 19

**Figure 11.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour l'érable à sucre de classe CR, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques ..... 19

**Figure 12.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour l'érable à sucre de classe M ou S, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou toutes qualités ABCD) ..... 20

**Figure 13.** Volumes moyens par catégorie de produits en fonction du DHP pour le bouleau à papier, le chêne rouge et l'érable rouge au Québec ..... 21

**Figure 14.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie au Québec selon le DHP pour le bouleau à papier, le cerisier tardif, le chêne rouge, l'érable rouge, les peupliers (le peuplier faux-tremble et le peuplier à grandes dents) et le tilleul d'Amérique ..... 22

**Figure 15.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans selon le DHP initial pour le bouleau à papier, le cerisier tardif, le chêne rouge, l'érable rouge (tous et ceux au sud de 46,25° de latitude N [lettre S]), le peuplier faux-tremble, le peuplier à grandes dents et le tilleul d'Amérique au Québec ..... 23

**Figure 16.** Proportion moyenne du volume marchand brut représentée par le volume net pour 6 essences résineuses, selon le DHP ..... 24

**Figure 17.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie selon le DHP pour les épinettes (l'épinette blanche et l'épinette rouge), le pin blanc, la pruche du Canada, le sapin baumier et le thuya occidental ..... 24

**Figure 18.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour les épinettes (épinettes blanche et rouge), le pin blanc, la pruche du Canada, le sapin baumier et le thuya occidental au Québec. Les valeurs affichées au-dessus des courbes représentent respectivement le nombre d'observations dans les classes de DHP de 18, 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la classe de DHP minimale pour la classe d'arbres, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations ..... 25

**Figure 19.** Taux annuel moyen de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre en fonction du DHP initial pour le bouleau jaune de classe CR, selon la classe de qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques, en comparant 6 analyses de sensibilité à la courbe étalonnée avec les valeurs d'origine ..... 26

**Figure 20.** Taux annuel moyen de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre en fonction du DHP initial pour l'érable à sucre de classe CR, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques, en comparant 6 analyses de sensibilité à la courbe étalonnée avec les valeurs d'origine ..... 28

# Liste des abréviations et définition de certains termes utilisés dans cet ouvrage

| | |
|---|---|
| 2a3abc | Territoire regroupant les régions écologiques des collines de la basse Gatineau (2a), les collines de l'Outaouais et du Témiscamingue (3a), les collines du lac Nominingue (3b) et les hautes collines du bas Saint-Maurice (3c), soit les domaines bioclimatiques de l'érablière au nord du fleuve Saint-Laurent. |
| 4abcd | Territoire regroupant les régions écologiques des plaines et coteaux du lac Simard (4a), des coteaux du réservoir Cabonga (4b), des collines du moyen Saint-Maurice (4c) et des hautes collines de Charlevoix et du Saguenay (4d). |
| A, B, C, D | Classes de qualité d'un arbre feuillu sur pied (DHP > 23,0 cm), en ordre décroissant de qualité potentielle pour le sciage. Le seuil minimal de DHP est de 39,1 cm pour la classe A, de 33,1 cm pour la classe B et de 23,1 cm pour les classes C et D. |
| AB, ABCD | Regroupement des classes de qualité A et B, ou A, B, C et D, respectivement. |
| Classification ABCD | Système de classement des arbres selon la qualité des tiges. |
| Classification MSCR | Système de classement selon la priorité de récolte, établie en fonction des défauts et des indices de la carie des arbres (et donc, du risque de mortalité). |
| CR | Regroupement des classes de priorité de récolte C et R de la classification MSCR. |
| DF1F2 | Billes d'une essence feuillue et de qualité déroulage (D) ou de qualité sciage F1 ou F2. C'est le bois d'œuvre de grande valeur provenant de l'une des quatre essences désirées suivantes : érable à sucre, bouleau jaune, bouleau à papier, chêne rouge. |
| DHP | Diamètre à hauteur de poitrine, mesuré à 1,3 m du sol. |
| DIF-PEP | Placettes-échantillons permanentes de la Direction des inventaires forestiers. |
| DMF | Diamètre à maturité financière. |
| DRF-CJ | Blocs expérimentaux servant à l'étude de la coupe de jardinage à la Direction de la recherche forestière. |
| Groupe « autres » | Territoire regroupant les régions écologiques situées dans la vallée du Saint-Laurent et la chaîne des Appalaches. |
| Inéquienne | Qualifie la structure d'un peuplement forestier dont les arbres appartiennent à plus d'une classe d'âge. |
| M, S, C, R | Classes des défauts et indices de la carie des arbres (M = moribond, S = survivant, C = en croissance pour être conservé, R = réserve). |
| MER-CJ | Réseau de mesure des effets réels de la coupe de jardinage pratiquée dans un contexte opérationnel de 1995 à 1999. |
| MÉRIS | Modèle d'évaluation de la rentabilité des investissements sylvicoles. |
| MJ | Famille des végétations potentielles de la bétulaie jaune. |
| MLMG | Modèle linéaire mixte généralisé |
| MS1 | Végétation potentielle de la sapinière à bouleau jaune. |

| | |
|---|---|
| RCP | *Representative concentration pathway*, ce qui signifie « trajectoires représentatives de concentration ». |
| RP1 | Végétation potentielle de la pinède à pin blanc ou pin rouge. |
| RT1 | Végétation potentielle de la prucheraie. |
| TBE | Tordeuse des bourgeons de l'épinette. |
| VMB | Volume marchand brut ; volume ligneux du tronc et des branches sous écorce compris entre une hauteur de souche de 15 cm et un diamètre d'utilisation de 9,1 cm avec écorce. |

# Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier les nombreuses personnes qui ont contribué à l'établissement et au suivi des 3 réseaux de placettes permanentes utilisées dans ce projet, notamment Zoran Majcen, Steve Bédard, Pierrot Boulay, Jocelyn Hamel et Sébastien Meunier. Nous remercions aussi Filip Havreljuk pour le calcul des volumes par produits et ses commentaires constructifs sur une version préliminaire de ce mémoire, Catherine Périé pour les informations sur les effets anticipés des changements climatiques, Julie Bouchard et Pierre Therrien pour les informations sur les ravageurs forestiers, Isabelle Auger pour ses conseils statistiques, Sébastien Crosnier-Pichette pour ses conseils avec l'analyse financière, Jean Noël pour le soutien cartographique, puis Sébastien Meunier et François Boucher pour leurs conseils au sujet des besoins des praticiens. Finalement, nous remercions Steve Bédard pour son travail comme responsable de la révision scientifique, les deux réviseurs anonymes qui ont commenté le manuscrit, Denise Tousignant et Armelle Ginet pour l'édition, de même que Stéphanie Rivet (Pulsation Graphique) pour le montage graphique de ce document. Ce projet a été financé par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts dans le cadre des projets n$^{os}$ 142332023, 142332026, 142332048 et 142332053.

# Introduction

Le Québec est recouvert par près de 93 000 km² de forêts décidues ou mixtes, dans lesquelles l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall) ou le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) constituent généralement les essences dominantes. Ces essences sont concentrées dans ce qui correspond à la zone tempérée nordique, soit la portion sud du Québec qui regroupe le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune et les domaines bioclimatiques de l'érablière à bouleau jaune, de l'érablière à tilleul (*Tilia americana* L.) et de l'érablière à caryer cordiforme (*Carya cordiformis* (Wangenh.) K. Koch) (Saucier *et al.* 2009). Dans ces peuplements forestiers dominés par les feuillus tolérants à l'ombre, l'approche d'aménagement forestier préconisée est celle de pratiquer des coupes partielles de manière à protéger une partie de la régénération préétablie sous le couvert, à laisser croître les plus petits arbres, puis à récolter une partie des arbres les plus gros parmi ceux qui sont les plus susceptibles de mourir ou de se dégrader. Sur les terres du domaine de l'État (soit 92 % de la forêt québécoise), ces coupes partielles sont généralement planifiées par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts, puis réalisées par des titulaires de permis pour la récolte de bois, conformément à la *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier* (A-18.1)[a].

Un défi lors de la réalisation de coupes partielles pour approvisionner une usine de bois d'œuvre de feuillus est de tirer un revenu suffisant à partir des bois récoltés pour amortir les coûts d'approvisionnement. D'un côté, le bois représente un revenu brut pour l'usine, soit la valeur marchande des produits et sous-produits issus de la transformation, de laquelle sont soustraits les coûts de transformation. De l'autre côté, la récolte du bois, son transport à l'usine et son prix représentent un coût d'approvisionnement pour l'usine. La différence entre le revenu brut et le coût d'approvisionnement correspond au revenu net d'approvisionnement, qui détermine la rentabilité financière de l'usine. À titre indicatif, le coût moyen d'approvisionnent des scieries de feuillus au Québec était d'environ 70 $/m³ en 2019 (Groupe DDM 2021). Il existe cependant une grande variation autour de cette moyenne, en raison de plusieurs facteurs comme la distance de transport, la composition en essences, etc. En comparaison, le revenu brut tendance[b] issu du sciage d'une bille d'érable à sucre ou de bouleau jaune était estimé à 54-64 $/m³ pour les billes de faible qualité et pouvait atteindre 137 $/m³ pour celles de qualité supérieure[c]. Par conséquent, l'atteinte de la rentabilité requiert notamment la récolte d'un panier de produits comprenant assez de billes de haute qualité pour compenser les pertes engendrées par la récolte des billes de faible qualité. Or, la probabilité d'obtenir une bille de haute qualité varie selon l'essence ; elle augmente avec le diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre (DHP : mesuré à une hauteur de 1,3 m du sol) et avec sa classe de qualité apparente sur pied (voir Havreljuk *et al.* 2015).

Un autre aspect important dans le calcul de la rentabilité de l'approvisionnement pour un scieur de feuillus est que celui-ci ne transforme qu'une petite partie des bois qu'il récolte. En effet, environ 50 % du bois récolté par les scieurs de feuillus est constitué d'essences destinées à d'autres usines que les leurs, comme des résineux (Groupe DDM 2021). De plus, la majeure partie du volume des essences transformées prend la forme de billes destinées à la production de pâtes et papier, de bois énergétique, de sciures ou de copeaux (voir Havreljuk *et al.* 2015). Or, le marché pour ces volumes est déficient dans plusieurs régions, et celui pour le bois à pâte est en décroissance depuis le milieu de la décennie 2000[d]. De plus, les prix tendance obtenus pour des livraisons aux usines de pâtes et papiers se situent aux environs de 50 à 55 $/m³ (S. Crosnier-Pichette, Bureau de mise en marché des bois, communication personnelle, 2021), ce qui est bien inférieur au coût moyen d'approvisionnement d'environ 70 $/m³.

L'absence de débouchés pour les bois de faible qualité cause une pression à récolter davantage les plus gros arbres de belle qualité des essences les plus recherchées, afin de rentabiliser les opérations. Cette pression n'est pas nouvelle et rappelle l'historique d'écrémage des forêts décidues et mixtes lorsque la coupe à diamètre limite était pratiquée (Majcen 1994). Pour freiner cette surexploitation de

a http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/a-18.1
b Une valeur tendance est en fait une moyenne ajustée sur plusieurs années.
c Données provenant du Modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles (MÉRIS) : https://bmmb.gouv.qc.ca/analyses-economiques/outils-d-analyse/
d Données de Fastmarkets RISI (https://www.risiinfo.com/ic/pubs/reports) et données extraites par Louis Gagnon de la Direction du développement et de l'innovation de l'industrie du MRNF à partir des sources suivantes : *World graphic paper forecast* (22 août 2022), *World graphic paper annual historical data* (10 février 2022), *World pulp & recovered paper forecast 5-year* (28 septembre 2022), *World pulp annual historical data* (28 juillet 2022).

la ressource, les autorités ministérielles ont préconisé, dès 1993, la pratique de la coupe de jardinage dans ces forêts du Québec (MRN 1994). Ce procédé de régénération consiste en des coupes partielles d'arbres, choisis individuellement ou en petits groupes dans un peuplement de structure inéquienne, pour en récolter la production tout en aidant le peuplement à atteindre une structure équilibrée ou à s'y maintenir (MRN 2013). L'approche préconisée dans la pratique consistait à récolter principalement des arbres défectueux dans le but d'améliorer la qualité des peuplements et augmenter leur production de bois d'œuvre (Majcen *et al.* 1990). En 2002, après la publication des premiers résultats indiquant que les rendements étaient inférieurs aux attentes (Bédard et Brassard 2002), la mise en œuvre d'un plan d'action (MRNFP 2002) a notamment permis d'orienter davantage la sélection des arbres à récolter vers ceux les plus à risque de mourir ou de se dégrader, lesquels forment aussi un panier de produits de moins bonne qualité pour la récolte de bois d'œuvre. Toutefois, cette pression sur l'industrie du bois d'œuvre est survenue en même temps qu'un effondrement des prix des produits du bois en 2005, ce qui a eu pour effet de réduire substantiellement la superficie des aires récoltées. Parmi les solutions envisagées pour améliorer le revenu net d'approvisionnement sans compromettre le rendement à plus long terme, l'idée de récolter aussi une partie des gros arbres de belle qualité a refait surface. À cette fin, il fallait identifier les arbres de belle qualité susceptibles de perdre de la valeur ou de ne plus produire de revenu additionnel en bois d'œuvre dans le futur, malgré leur apparente vigueur. De tels arbres ont atteint leur maturité financière.

Cette notion a été abondamment étudiée aux États-Unis. À cet égard, dans le contexte de l'aménagement du pin blanc (*Pinus strobus* L.), Lockard et McQuilkin (1959) avaient proposé d'évaluer la maturité financière de chaque arbre avec deux objectifs, le premier étant de juger s'il était préférable de réaliser une coupe partielle plutôt qu'une coupe totale dans des peuplements de structure irrégulière. La coupe partielle était alors préconisée lorsqu'il y avait beaucoup d'arbres immatures que le ou la propriétaire avait intérêt à laisser croître. Le second objectif était de considérer la maturité financière lors de la sélection des arbres à récolter en priorité lorsque la coupe partielle était choisie comme le traitement à privilégier. Un arbre atteint le diamètre à maturité financière (DMF) lorsque sa perspective de rendement financier futur est inférieure aux attentes du ou de la propriétaire. Cette perspective est déterminée par le taux de croissance en DHP, la probabilité que l'arbre parvienne à maintenir ou à améliorer la qualité de son tronc ou, au contraire, le risque que cette qualité se dégrade. Lockard et McQuilkin (1959) ont aussi proposé que les arbres de faible qualité soient considérés *de facto* comme matures, sauf s'ils ont le potentiel d'améliorer leur qualité.

Ce sont principalement Joseph Mendel, William Leak et George Trimble qui ont ensuite commencé à quantifier la notion de DMF pour plusieurs autres essences du nord-est des États-Unis et que l'on trouve aussi au Québec (Leak 1969, Mendel 1969, Mendel et Trimble 1969, Trimble et Mendel 1969, Trimble *et al.* 1974). À partir d'observations de croissance, ils ont estimé le taux annuel de rendement financier que pouvaient offrir des arbres des différents DHP sur une période de 10 ans. Ainsi, ils ont identifié des DMF selon divers taux minimaux de rendement, généralement 2 %, 4 % ou 6 % par année. Notons que leurs travaux ont porté principalement sur le potentiel de croissance des arbres, autant en DHP qu'en hauteur marchande, ainsi que sur leur potentiel d'amélioration de la qualité de leur tronc, mais pas vraiment sur le risque que le tronc se dégrade ou que l'arbre meure. Trimble *et al.* (1974) ont résumé ainsi les principaux constats de ces analyses :

1. Le taux annuel de rendement est plus faible pour les arbres ayant de grands DHP, même si les plus gros arbres valent plus cher que les plus petits.
2. Ce taux est plus faible aussi pour les arbres de meilleure qualité, même si ceux-ci valent plus cher que les arbres de faible qualité.
3. Ce taux atteint les valeurs les plus élevées lorsque l'arbre a encore le potentiel d'améliorer sa qualité, que ce soit par la classe de sa bille de pied ou par sa hauteur contenant des billes de bois d'œuvre.
4. Ce taux augmente beaucoup avec le taux d'accroissement en DHP.
5. Ce taux n'est pas beaucoup plus élevé pour les arbres ayant une plus grande hauteur marchande que pour les arbres moyens.

Les calculs de DMF sur la base des observations de l'évolution d'arbres du Québec ont débuté en 2014 avec les travaux d'un comité sectoriel (Saucier *et al.* 2014), avant d'être révisés dans Guillemette (2016). Ces travaux ont démontré qu'il n'y avait pas de gain financier en bois d'œuvre à laisser croître au-delà d'un DHP de 43 à 47 cm un érable à sucre ou un bouleau jaune vigoureux et détenant un potentiel de bois d'œuvre, selon

l'essence et la situation géographique. Ces DMF ont été calculés à un taux minimal de rendement annuel de 0 % sur une période de 20 ans. Le choix d'un taux minimal de 0 %, plutôt que de 2 %, 4 % ou 6 % comme dans les études américaines, a été fait par Saucier *et al.* (2014) pour tenir compte de l'approche d'aménagement écosystémique utilisée en forêt publique, par laquelle les aménagistes cherchent notamment à maintenir des attributs de vieilles forêts, ce qui comprend de gros arbres sur pied. Un taux de 3,5 % est habituellement recommandé pour des investissements publics (Boardman *et al.* 2010). Néanmoins, ces DMF de 43 à 47 cm au Québec étaient comparables à certains des DMF proposés pour ces essences dans le nord-est des États-Unis (Hansen et Nyland 1987, Leak *et al.* 1987). Notons que la quantification des risques de dégradation de la qualité de l'arbre ou de sa mortalité pourrait expliquer en bonne partie pourquoi les rendements dans l'étude de Guillemette (2016) sont plus faibles que dans la plupart des études américaines les plus anciennes. Dans ses plus récentes propositions de DMF, William Leak s'est basé sur le DHP qui représente l'atteinte de la plus haute classe de qualité que l'arbre peut atteindre, sans considérer toute la dynamique de croissance, de risque de mortalité ou de changement de la qualité de son tronc (Leak *et al.* 2014, 2017).

L'idée de récolter des arbres ayant atteint le seuil de DMF a été introduite dans la planification forestière et l'approvisionnement d'usines de transformation de bois de feuillus au Québec (p. ex. : MFFP 2017). Les DMF calculés étaient seulement ceux décrits par Guillemette (2016), dont l'étude était limitée à des érables à sucre et des bouleaux jaunes qui avaient été classés selon le système des vigueurs de Majcen *et al.* (1990). Ce système a servi jusqu'au début des années 2000 pour sélectionner des arbres lors de la coupe de jardinage. Or, les ingénieurs forestiers qui préparent des prescriptions sylvicoles ont aussi besoin de connaître le DMF d'autres essences présentes en forêt décidue et mixte. À cet effet, ils utilisent plutôt la classification MSCR (Boulet 2005) pour établir la priorité de récolte des arbres en fonction du risque de mortalité lors d'une coupe partielle, et parfois aussi la classification de la qualité de la bille de pied des feuillus (classification ABCD, MFFP 2014a). De plus, les modèles d'estimation des produits de l'érable à sucre et du bouleau jaune qui ont été utilisés par Guillemette (2016) pour calculer la valeur des arbres viennent d'être mis à jour (Havreljuk *et al.* soumis), notamment grâce à l'ajout de nouveaux échantillons. Ces nouveaux modèles offrent maintenant une meilleure régionalisation des estimations. De plus, les estimations précédentes pour le Québec n'incluaient pas d'analyse de sensibilité des résultats, dans laquelle une procédure de calcul est utilisée pour prédire l'effet de la variation des données initiales sur les résultats du modèle (Jovanović 1999). Une telle analyse sert à tester la validité et l'exactitude du modèle, à rechercher des erreurs potentielles et à trouver des pistes pour le simplifier ou pour prioriser les informations à acquérir en vue de l'améliorer (Pannell 1997).

L'analyse de l'évolution du revenu brut d'approvisionnement et l'identification des DMF est basée sur des observations tirées du passé sur des arbres qui, pour la plupart, ont pu avoir été affectés par des ravageurs indigènes. Or, l'évolution à venir des essences étudiées pourrait diverger d'une vision déterministe et linéaire basée sur le passé (Messier *et al.* 2016), principalement à cause de leur vulnérabilité aux changements climatiques et aux invasions de ravageurs exotiques (insectes et maladies). Ainsi, les évolutions prédites pourraient ne pas se réaliser au cours des prochaines décennies, ce qui pourrait modifier les recommandations d'aménagement. À titre indicatif, environ 4 nouveaux ravageurs exotiques ayant un grand impact sur les arbres sont introduits chaque décennie aux États-Unis depuis 1860 (Aukema *et al.* 2010).

La présente analyse a pour objectif principal de calculer le DMF de 15 essences forestières rencontrées sur les principales végétations potentielles dans la zone tempérée nordique au Québec, là où des coupes partielles sont couramment pratiquées. Ce calcul nous renseigne sur le potentiel des arbres à générer un revenu pour une usine de transformation. Il permet aussi d'identifier le revenu potentiel que des scieurs peuvent obtenir des arbres feuillus, puis de les comparer au coût moyen d'approvisionnement. Un autre objectif est d'évaluer la sensibilité des trois variables susceptibles d'apporter le plus d'incertitude sur les résultats : la croissance en DHP, l'évolution de la qualité des arbres feuillus et les prix futurs des produits. Un dernier objectif est d'évaluer si les changements environnementaux anticipés dans quelques décennies pourraient rendre inapplicables les modèles étalonnés sur des observations passées. Pour ce faire, nous avons analysé la vulnérabilité des essences de la zone tempérée nordique face aux changements climatiques anticipés et aux ravageurs exotiques.

# Chapitre 1 — Matériel et méthodes

Les données et la méthode de calcul des DMF sont semblables à ce que décrit Guillemette (2016). De manière succincte, le calcul du DMF requiert d'abord une estimation de la valeur monétaire des arbres (soit le revenu brut d'approvisionnement pour l'industrie) au début et à la fin d'une période de croissance. Pour chacun des arbres, la différence de revenu entre ces deux périodes est ensuite rapportée sur une base de changement annuel, puis l'ensemble de ces revenus est modélisé selon le DHP initial de l'arbre afin d'identifier à partir de quel DHP le potentiel de revenu diminue, ce qui représente le DMF moyen. Un intervalle de confiance de 95 % est calculé autour de cette moyenne, ce qui permet d'obtenir un intervalle de DMF, tandis que le DMF moyen représente la meilleure donnée.

## 1.1 Données

Les données de croissance des arbres proviennent de 3 jeux de données : les placettes-échantillons permanentes de la Direction des inventaires forestiers (DIF-PEP), les blocs expérimentaux servant à étudier la coupe de jardinage à la Direction de la recherche forestière (DRF-CJ) et le réseau de mesure des effets réels de la coupe de jardinage 1995-1999 (MER-CJ). Une description détaillée de ces 3 réseaux est disponible dans les références citées au tableau 1, lequel présente un aperçu du nombre de placettes, de leur superficie individuelle et cumulée, puis du nombre d'arbres utilisés dans la présente étude. Les 15 essences examinées pour l'étude financière sont : le bouleau jaune, le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall), le cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.), le chêne rouge (*Quercus rubra* L.), l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.), l'érable rouge (*Acer rubrum* L.), l'érable à sucre, le peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata* Michx), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), le pin blanc, la pruche du Canada (*Tsuga canadensis* (L.) Carrière), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) et le tilleul d'Amérique. Toutefois, l'épinette blanche et l'épinette rouge ont été regroupées lors de l'analyse.

Les placettes retenues étaient situées dans des forêts privées ou de l'État au Québec, dans les domaines bioclimatiques de l'érablière et de la sapinière à bouleau jaune, soit dans la zone tempérée nordique (Saucier *et al.* 2009 ; figure 1). La végétation potentielle de ces placettes devait être de type feuillu (code débutant par F), mixte à bouleau jaune (code débutant par MJ ou MS1) ou bien résineux à dominance de pin blanc (code RP1) ou de pruche du Canada (code RT1). De plus, nous n'avons retenu que les placettes pour lesquelles il y avait au moins 2 mesures disponibles et dans lesquelles les classes de priorité de récolte (MSCR) et celles de qualité (ABCD) avaient été notées sur les arbres feuillus ayant un DHP > 23 cm. De plus, il ne devait pas y avoir eu de coupe au cours de l'intervalle de mesure des placettes, ni de perturbation d'origine assez récente pour avoir été documentée. La première mesure utilisée couvrait généralement la période de 2003 à 2009, puis la seconde était généralement dans la période de 2010 à 2019, ce qui a résulté en une période de croissance moyenne de 10,8 ans (valeur minimale: 4 ans ; valeur maximale : 15 ans). Les DMF calculés le sont donc sur une période d'environ 11 ans (d'où la notation : $DMF_{11\ ans}$). La présence ou l'absence d'une coupe partielle récente a été notée : elle était associée au

**Tableau 1.** Description sommaire des réseaux de placettes-échantillons à l'étude. DIF-PEP = réseau des placettes-échantillons permanentes de la Direction des inventaires forestiers ; DRF-CJ = blocs expérimentaux servant à l'étude de la coupe de jardinage à la Direction de la recherche forestière ; MER-CJ = réseau de mesure des effets réels de la coupe de jardinage 1995-1999.

| Réseau | Superficie des placettes ($m^2$) | Nombre de placettes | Superficie cumulée (ha) | Nombre d'arbres à l'étude | Références |
|---|---|---|---|---|---|
| DIF-PEP | 400* | 1 691 | 67,64 | 42 986 | MFFP 2014b, 2016 |
| DRF-CJ | 2 500 | 265 | 66,25 | 21 071 | Fortin *et al.* 2009, Guillemette *et al.* 2018 et Majcen *et al.* 2005 |
| MER-CJ | 400 | 779 | 31,16 | 12 231 | Guillemette *et al.* 2013 |
| **Total** | **s. o.** | **2 735** | **165,05** | **76 288** | |

* Les arbres ayant un DHP ≥ 31,1 cm sont mesurés sur une surface de 625 $m^2$.

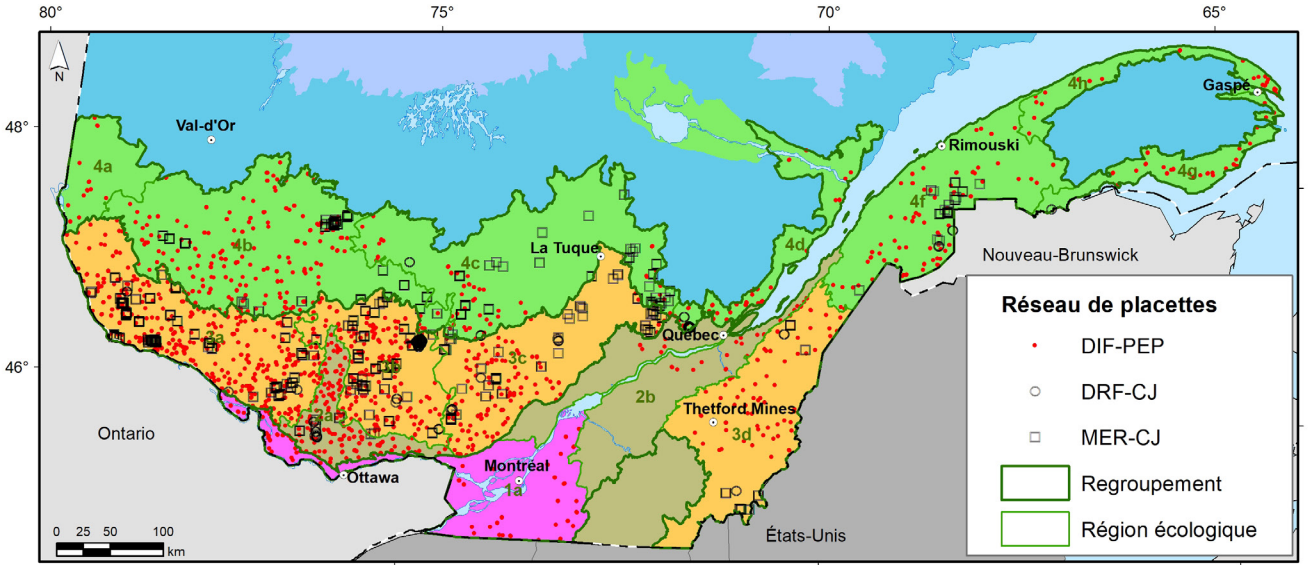


**Figure 1.** Carte de la répartition des placettes-échantillons utilisés dans la présente étude selon leur réseau, la région écologique et le regroupement de celles-ci. Les couleurs correspondent aux sous-domaines bioclimatiques (Saucier *et al.* 2009) : rose = érablière à caryer cordiforme ; brun = érablière à tilleul ; orange = érablière à bouleau jaune ; vert = sapinière à bouleau jaune ; bleu = sapinière à bouleau à papier ; violet = pessière à mousses. Les contours vert clair délimitent les régions écologiques, identifiées par les codes suivants : 1a = plaine du bas Outaouais et de l'archipel de Montréal ; 2a = collines de la basse Gatineau ; 2b = plaine du Saint-Laurent ; 3a = collines de l'Outaouais et du Témiscamingue ; 3b = collines du lac Nominingue ; 3c = hautes collines du bas Saint-Maurice ; 3d = coteaux des basses Appalaches ; 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 ; 4f = collines des moyennes Appalaches ; 4g = côte de la baie des Chaleurs ; 4h = côte gaspésienne. Les contours vert foncé délimitent les regroupements de régions écologiques utilisés dans le cadre de la présente étude.

traitement étudié dans les réseaux DRF-CJ et MER-CJ, tandis que dans le réseau DIF-PEP, elle a été déduite par l'observation sur le terrain de la présence d'une coupe partielle survenue dans l'un des mesurages précédant celui à l'étude. Un tiers des observations ont été réalisées dans des placettes-échantillons traitées par une coupe partielle quelques années avant la première mesure.

Les données de terrain utilisées à l'échelle de l'arbre à la première et à la dernière mesure de la période de croissance sont : 1) l'état de l'arbre (vivant ou mort), 2) son essence, son DHP, sa classe de priorité de récolte (classification MSCR) et, pour les feuillus ayant un DHP > 23 cm, sa classe de qualité (classification ABCD). Le classement MSCR vise à qualifier les arbres selon un gradient de risque de mortalité au cours du prochain cycle de coupe, sur la base de la présence de défauts sur l'arbre (Boulet 2005). Dans ce système, les arbres sont classés comme moribonds (M), survivants (S), en croissance pour être conservés (C) ou en réserve (R), suivant un ordre décroissant de risque de mortalité anticipé. Les arbres M sont souvent caractérisés par la présence d'une infection fongique, de pourriture abondante ou d'un dépérissement du houppier. Les arbres S sont fréquemment associés à la présence d'une fente sur le tronc ou à une petite quantité de pourriture. Enfin, les arbres C et R sont considérés comme sains et vigoureux ; ces deux classes ont été fusionnées aux fins des analyses (classe CR). Les arbres C présentent généralement des défauts mineurs, tels qu'un coude ou une courbure du tronc, qui n'affectent pas la survie de l'arbre. Selon la classification ABCD, l'arbre est classé A, B, C ou D en ordre décroissant de qualité potentielle pour le sciage, selon son DHP et l'ampleur des défauts observés sur la première section de 5 m de son tronc (MFFP 2014a). Le seuil minimal de DHP est de 39,1 cm pour la classe A et de 33,1 cm pour la classe B, tandis que pour les arbres de classe C et D, ce seuil est de 23,1 cm. Les arbres A et B ont été regroupées (classe AB) aux fins des analyses.

## 1.2 Traitement des données

Le calcul des DMF requiert d'estimer en premier le revenu potentiel de chaque arbre pour ses produits forestiers au début et à la fin de la période de croissance (figure 2). Pour les arbres morts en cours de période, nous avons estimé le revenu potentiel seulement au début de la période de croissance.

| Caractéristiques initiales (temps 0) : essence, $DHP_0$ et $qualité_0$ (ABCD) | | | | Caractéristiques finales (temps 1) : essence, $DHP_1$ et $qualité_1$ (ABCD) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Produit** | **Volume** | **Revenu unitaire** | **Revenu arbre ($)** | **Produit** | **Volume** | **Revenu unitaire** | **Revenu arbre ($)** |
| $F1_0$ | $A_0$ m³ | $C_0$ \$/m³ | $= A_0 \times C_0$ | $F1_1$ | $M_1$ m³ | $Y_1$ \$/m³ | $= M_1 \times Y_1$ |
| $F2_0$ | $B_0$ m³ | $D_0$ \$/m³ | $= B_0 \times D_0$ | $F2_1$ | $N_1$ m³ | $Z_1$ \$/m³ | $= N_1 \times Z_1$ |
| … | … | … | … | … | … | … | … |
| **$Total_0$** | | | **$= \sum$ des $\$_0$** | **$Total_1$** | | | **$= \sum$ des $\$_1$** |

**Changement annuel de revenu = ($Total_1$ – $Total_0$) ÷ nombre d'années**

**Figure 2.** Schéma illustrant le calcul du changement annuel de revenu pour un arbre feuillu, selon ses caractéristiques initiales et celles observées à la fin de la période de croissance.

Le revenu potentiel d'un arbre feuillu ayant un DHP > 23 cm est obtenu à partir d'une estimation des volumes nets de l'arbre (m³) par type de bille selon des modèles de produits basés sur la classe de qualité et étalonnés en 2021 par Havreljuk *et al.* (soumis). Les modèles pour l'érable à sucre et le bouleau jaune ont été récemment étalonnés de manière à présenter des volumes différents par type de bille selon la région écologique (d'après Saucier *et al.* 2009). Pour les régions écologiques n'ayant pas de modèle de répartition spécifique, nous avons posé l'hypothèse que le modèle approprié serait celui de la région écologique la plus proche, en considérant la géographie et le domaine bio-climatique. Par ailleurs, les modèles pour le bouleau à papier, le chêne rouge et l'érable rouge sont des moyennes provinciales d'après les modèles d'Havreljuk *et al.* (2015). Pour les feuillus ayant un DHP ≤ 23 cm et pour les autres essences feuillues, nous avons utilisé les matrices de répartition par produits basées sur l'essence et le DHP qui sont disponibles dans la version 2.2 de l'outil MÉRIS[e] du Bureau de mise en marché des bois. Notons que la matrice utilisée pour le cerisier tardif est celle du chêne rouge, et que celle utilisée pour le tilleul d'Amérique est celle du bouleau jaune.

Une description détaillée des types de billes prédites pour les feuillus avec ces modèles est présentée dans Petro et Calvert (1976). En somme, les billes de sciage conventionnel de gros volume et de belle qualité sont de type F1 et F2, les plus petites billes de sciage conventionnel et celles plus grosses, mais de qualité moindre, sont de type F3, puis les billes destinées à la pâte sont de type P. Les modèles prédisent aussi un faible volume de petites billes de sciage non conventionnel (ou billons) de type F4 (Giguère 1998). La notion de bois d'œuvre pour les arbres feuillus dans ce rapport implique les billes de sciage conventionnel (F1 à F3) et celles de déroulage (type D). Au sein du bois d'œuvre, un sous-ensemble d'intérêt est défini pour les billes de grande valeur (D, F1 et F2), et nommé DF1F2. Notons que ce classement des billes de sciage (F1 à F3) a été conçu de manière cohérente avec les classes de qualité de la bille de pied des arbres (Hanks 1976)[f]. Ainsi, un arbre de classe A, B ou C a de fortes chances de produire une bille de pied de qualité F1, F2 ou F3, respectivement.

Le volume net des essences résineuses dans l'outil MÉRIS a été calculé en soustrayant une proportion du volume marchand brut (VMB) pour la carie. Nous n'avons pas fait de distinction entre le volume de bois d'œuvre et celui de la pâte, car pratiquement toutes les billes sont d'abord sciées avant que les copeaux soient transférés aux usines de pâte. Dans l'outil MÉRIS, le VMB est calculé selon les équations de Perron (2003) et en utilisant les tarifs de cubage locaux (relations hauteur et DHP)

e https://bmmb.gouv.qc.ca/analyses-economiques/outils-d-analyse/

f Notons que le système américain de classement des arbres feuillus sur pied utilise les classes 1, 2, 3 et *below-grade*, lesquelles sont équivalentes aux classes de qualité québécoises A, B, C et D, respectivement.

produits par la Direction des inventaires forestiers pour le 3e ou le 4e programme d'inventaire, lorsque ce dernier est disponible.

Le revenu potentiel de l'arbre a été calculé en additionnant le revenu potentiel de chaque type de billes dans l'arbre ; ces revenus étant obtenus en multipliant le volume d'un type de bille par son revenu unitaire. Les revenus potentiels unitaires des billes ($ canadiens/m$^3$) ont été extraits de l'outil MÉRIS. Pour les billes destinées au sciage, il s'agit de revenus tendance en 2018. Pour les billes de pâte et de déroulage, l'outil MÉRIS se base sur une opinion d'expert au sujet des prix que pourraient obtenir les scieries pour la vente ou l'échange de ces billes à d'autres usines de transformation (tableau 2). Le changement de prix entre la première et la dernière période de mesure n'a pas été ajusté pour tenir compte de l'inflation. Ce sont des prix en dollars constants de 2018. Le changement annuel de revenu de chaque arbre a été obtenu en calculant la différence entre son revenu final et son revenu initial, puis cette différence a été divisée par la durée de la période de croissance entre les deux prises de données.

Le grand nombre de données pour l'érable à sucre (30 034 arbres) et le bouleau jaune (9 330 arbres) a permis de subdiviser le jeu de données de chacune de ces 2 essences en 15 groupes. Les 6 premiers groupes sont constitués des arbres répartis dans toute la province, mais ils se démarquent par la combinaison de la classe de priorité de récolte (2 classes : M ou S) et de la classe de qualité de la bille de pied (3 classes : AB, C ou ABCD regroupées). Les 9 autres groupes sont des subdivisions territoriales des groupes CR-AB, CR-C et CR-ABCD : un territoire regroupant les domaines de l'érablière au nord du fleuve Saint-Laurent, soit les régions écologiques 2a, 3a, 3b et 3c (groupe « 2a3abc »), un autre territoire regroupant les domaines de la sapinière à bouleau jaune au nord du fleuve Saint-Laurent, soit les régions écologiques 4a, 4b, 4c et 4d (groupe « 4abcd »), puis un troisième territoire regroupant les régions écologiques situées dans la vallée du Saint-Laurent et la chaîne des Appalaches, soit les régions écologiques 1a, 2b, 3d, 4f, 4g et 4h (groupe « autres »). Les noms complets des régions écologiques apparaissent dans la légende de la figure 1. Nos hypothèses étaient que la croissance et les taux de mortalité variaient selon ces 3 grands territoires et selon la classe de priorité de récolte (Hartmann *et al.* 2008, Power 2021), et que la classe de qualité influençait le changement potentiel de revenu (Trimble *et al.* 1974).

**Tableau 2.** Revenus tendance (en $ canadiens de 2018/m$^3$) des produits de bois par essence.

| Essence* | Revenu tendance par catégorie de produits ($ canadiens de 2018/m$^3$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Déroulage | Sciage F1 | Sciage F2 | Sciage F3 | Billon F4 | Pâte | Tous les produits |
| Bouleau jaune | 195,09 | 137,45 | 104,94 | 53,51 | 44,49 | 53,00 | – |
| Bouleau à papier | 155,34 | 89,17 | 68,34 | 50,75 | 50,75 | 51,00 | – |
| Cerisier tardif | 265,10 | 185,56 | 148,71 | 79,55 | 69,57 | 53,00 | – |
| Chêne rouge | 265,10 | 185,56 | 148,71 | 79,55 | 69,57 | 54,00 | – |
| Épinette blanche | – | – | – | – | – | – | 90,11 |
| Épinette rouge | – | – | – | – | – | – | 96,83 |
| Érable rouge | – | 58,78 | 53,76 | 51,00 | 51,00 | 51,00 | – |
| Érable à sucre | – | 135,29 | 106,92 | 63,90 | 47,90 | 55,00 | – |
| Peuplier à grandes dents | – | – | – | – | – | – | 75,64 |
| Peuplier faux-tremble | – | – | – | – | – | – | 75,64 |
| Pin blanc | – | 209,22 | 161,00 | 138,01 | – | 0,00 | – |
| Pruche du Canada (DHP > 29,0 cm) | – | – | – | 62,28 | – | 0,00 | – |
| Sapin baumier | – | – | – | – | – | – | 80,88 |
| Thuya occidental (DHP > 17,0 cm) | – | – | – | 74,28† | – | 0,00 | – |
| Tilleul d'Amérique | 122,55 | 57,58 | 57,58 | 30,40 | 30,40 | 33,00 | – |

* Pour les arbres ayant un DHP > 9,0 cm, sauf lorsque spécifié.
† Pour le thuya, cette classe et ce prix correspondent en fait à celui de billes destinées à la production de bardeaux (BMMB 2018).

Nous présentons deux résultats pour l'érable rouge : un pour l'ensemble de la province et un autre pour un sous-ensemble situé au sud de 45,25° de latitude Nord, afin d'évaluer l'hypothèse que sa qualité est meilleure dans le sud de la province. Ce seuil correspond à un besoin exprimé pour la partie sud des unités d'aménagement forestier de l'Outaouais. Nous n'avons pas subdivisé les données des autres essences selon leur classe ou leur territoire.

### 1.3 Analyses statistiques

Nous avons modélisé le changement annuel de revenu brut en bois d'œuvre (variable dépendante ; figure 2) des arbres selon leur DHP initial (variable indépendante) à l'aide d'un modèle linéaire mixte généralisé (MLMG) dans la procédure HPMIXED du progiciel SAS (SAS Institute Inc. 2021) et d'un effet de lissage (effet *spline*). Le MLMG permet d'étalonner un modèle statistique aux données ayant une variabilité non constante et dont la réponse n'est pas nécessairement distribuée normalement (comme dans le cas présent, à cause des changements de classe de qualité et des arbres qui meurent ; voir Guillemette 2016 pour plus d'explications relatives à cette difficulté). Ce modèle permet de spécifier un effet aléatoire de placette sur l'ordonnée à l'origine pour prendre en compte l'effet de la corrélation entre les arbres d'une même placette. La fonction *spline* utilisée dans ce MLMG est en fait une fonction polynomiale subdivisée en plusieurs parties, dans laquelle les polynômes individuels ont tous le même degré et se connectent en douceur aux points de jointure. De cette manière, la courbe s'ajuste à une grande variété de formes possibles. Cependant, le degré de lissage de la fonction est paramétrable : nous avons utilisé une valeur de 3 pour créer des courbes polynomiales de troisième degré. Pour obtenir le maximum de flexibilité, nous avons étalonné un modèle pour chacune des combinaisons d'intérêt d'essences ou de classes de qualité des arbres, plutôt que de tenter de tout modéliser en un seul modèle ayant des interactions complexes entre plusieurs paramètres.

Nous avons aussi calculé le taux annuel de changement de revenu d'approvisionnement en bois d'œuvre en divisant les revenus modélisés par le revenu initial de l'arbre selon son DHP, puis en multipliant ce rapport par 100 pour afficher le résultat en pourcentage. La moyenne et les intervalles de confiance à 95 % sur la moyenne sont présentés.

Il est important de préciser que les modèles ont été étalonnés dans tout l'intervalle d'observation des DHP, mais que les résultats sont présentés jusqu'à un DHP pour lequel il y avait au moins 30 observations à un DHP égal ou plus grand.

### 1.4 Interprétation du diamètre à maturité financière

Nous avons défini le $DMF_{11\ ans}$ moyen comme le plus petit DHP à partir duquel le taux moyen de changement de revenu devenait négatif de manière constante. De la même manière, les intervalles de confiance à 95 % sur le $DMF_{11\ ans}$ ont été identifiés aux plus petits DHP auquel le taux moyen de changement de revenu de ces courbes était négatif. Nous n'avons établi aucun DMF si la courbe n'avait pas de valeur négative dans l'intervalle étudié.

Les données disponibles nous permettaient de calculer des DMF sur une période de 11 ans, mais le besoin des praticiens et des praticiennes correspond plus souvent à une période de 30 ans entre deux coupes partielles. Or, plus l'horizon de temps est grand avant la prochaine coupe, alors plus petits sont les DMF, puisque la probabilité de mortalité et de dégradation augmente avec le temps (Moreau *et al.* 2023). Dans une étude précédente, Guillemette (2016) avait évalué que le DMF diminue d'environ 2 cm par décennie lorsque l'intervalle de temps s'allonge entre les 2 observations. Nous avons donc évalué le $DMF_{30\ ans}$ en réduisant de 4 cm le $DMF_{11\ ans}$. Cependant, pour les arbres feuillus de qualité AB, nous avons restreint cette réduction de manière à ne pas présenter de valeur de DHP inférieure au seuil minimal de 34 cm pour cette classe, afin d'éviter des incohérences. La poursuite de l'avancement des modèles de croissance en incluant à la fois la qualité des feuillus (classification ABCD) et leur risque de mortalité (classification MSCR) pourrait éventuellement combler cette faiblesse et permettre de réaliser des simulations sur 30 ans ou plus.

### 1.5 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité prédit comment des variations des données d'entrée influencent les résultats du modèle (Jovanović 1989). Nous avons appliqué cette procédure aux 3 variables susceptibles d'apporter le plus d'incertitude sur les résultats, et ce, pour les données de l'érable à sucre et du bouleau jaune appartenant à la classe CR (9 groupes chacun ; voir la section 1.2).

La première variable étudiée est la croissance en DHP, qui influence le panier de produits à la fin de la période de croissance et, conséquemment, la croissance du revenu que l'arbre peut procurer. Dans une première analyse, nous avons augmenté de 2 cm le DHP de chaque arbre à la fin de la période de croissance. Puis, dans une seconde analyse, nous avons diminué de 2 cm le DHP de chaque arbre à la fin de la période de croissance, sans toutefois le diminuer en deçà du DHP initial.

La deuxième variable étudiée est l'évolution de la classe de qualité (classification ABCD), puisqu'elle modifie les volumes et le panier de produits et influence donc beaucoup le revenu que l'arbre peut procurer. Dans une troisième analyse, nous avons augmenté d'une classe la qualité des arbres en fin de période, lorsque c'était possible selon les règles énoncées à la section 1.1. Par exemple, un arbre de la classe B pouvait être majoré à la classe A seulement si son DHP était > 39 cm. De même, si un arbre ayant un DHP > 39 cm et une qualité initiale C passait à la classe B au cours de la période de croissance, alors pour cette analyse de sensibilité, nous l'avons majoré à la classe A en fin de période de croissance. Ensuite, dans une quatrième analyse, nous avons diminué d'une classe la qualité des arbres à la fin de la période de croissance (sauf pour les arbres initialement de qualité D, qui se devaient de rester dans la même classe à la fin de la période de croissance).

La troisième variable étudiée est l'évolution des prix du panier de produits, en raison de son influence sur le revenu à la fin de la période et le gain ou la perte de revenu sur la période. Nous avons augmenté de 10 % les prix des produits en fin de période dans la cinquième analyse, puis nous les avons réduits de 10 % dans la sixième analyse. Ces changements de prix ont été choisis arbitrairement pour tester la sensibilité des modèles. Nous avons modélisé le changement annuel de revenu brut en bois d'œuvre des arbres de ces 6 analyses de la même manière que pour les données observées, c'est-à-dire avec le modèle original (section 1.3).

### 1.6 Vulnérabilité des essences aux changements anticipés

Les modèles étalonnés sur des observations passées pourraient ne pas s'appliquer dans quelques décennies à cause des changements environnementaux anticipés. Une telle situation pourrait mener à une recommandation différente d'utilisation du DMF pour une essence, ou bien mener à une évaluation à la hausse ou à la baisse du revenu potentiel que cette essence pourrait offrir. Nous avons donc procédé à une analyse de la vulnérabilité de 24 essences de la zone tempérée nordique à partir des résultats provenant de la littérature scientifique. Pour ce volet, les 9 essences s'ajoutant aux 15 essences de l'analyse financière étaient soit moins bien connues pour leurs répartitions par produits et revenus, soit déjà bien connues pour leur forte vulnérabilité à des ravageurs exotiques.

Nous avons d'abord recherché des ouvrages scientifiques qui résumaient les effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat (température, précipitations) des essences. L'effet sur l'habitat a été analysé pour le scénario de forçage radiatif RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway*, ce qui signifie « trajectoires représentatives de concentration ») pour la fin du siècle en cours. Le scénario 8.5 en est un de fortes émissions de gaz à effet de serre ; il se base sur diverses combinaisons de prévisions de la croissance de la population humaine, de l'activité économique, de l'intensité énergétique et du développement socioéconomique (GIEC 2014). Ce scénario ne prévoit aucun effort destiné à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Nous avons retenu l'étude de Périé *et al.* (2014) pour sa modélisation des effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des 24 essences considérées. Notons que cette équipe a d'abord modélisé la probabilité de présence d'une essence dans des cellules de 20 km × 20 km selon des variables climatiques, topographiques, édaphiques et géomorphologiques. Ensuite, elle a formé des classes de situations possibles allant de « l'habitat devient défavorable » jusqu'à « l'habitat devient davantage favorable ». Nous avons comparé notre évaluation des résultats de Périé *et al.* (2014) à ceux de l'étude de Prasad *et al.* (2020), dont l'analyse ressemble à plusieurs égards à celle de Périé *et al.* (2014) pour 17 des 24 essences, mais dans laquelle les auteurs ont plutôt modélisé un index d'abondance et de dominance des essences selon des variables climatiques seules.

Nous avons aussi comparé notre évaluation des résultats de Périé *et al.* (2014) à l'évaluation de la résistance des essences à la sécheresse. En effet, il s'agit de la principale source de stress que pourraient subir les arbres sur pied dans la zone tempérée nordique en raison des changements climatiques (voir Boisvert-Marsh *et al.* 2020). Les autres sources de stress que nous avons identifiées concernent davantage la capacité d'une essence à se régénérer (sur place ou en migration) ou sa tolérance au passage du feu. Bien qu'il soit possible que les feux deviennent plus fréquents ou plus intenses, plusieurs facteurs font en sorte que ces perturbations demeurent relativement rares dans la zone à l'étude (voir Couillard *et al.* 2022). L'étude de Boisvert-Marsh *et al.* (2020) a été retenue pour évaluer la capacité des essences à résister à la sécheresse d'après la valeur d'un index quantifiant leur capacité à éviter la sécheresse (profondeur d'enracinement) et leur résistance à des dommages

causés par la sécheresse (résistance du xylème à la cavitation et sensibilité stomatique). Les résultats de cette étude portent sur 19 des 24 essences que nous avons étudiées.

Nous avons ensuite évalué le degré de vulnérabilité de chaque essence face aux ravageurs exotiques présents ou susceptibles de s'introduire dans la zone tempérée nordique du Québec au cours des prochaines années. N'ayant pas trouvé une synthèse récente et complète, nous avons consulté les sites de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA)[g], de l'Invasive Species Center[h], et du USDA Animal and Plant Health Inspection Service[i]. Au besoin, nous avons complété l'information en consultant les sites d'autorités provinciales ou étatiques (p. ex. : celui de la Direction de la protection des forêts du ministère des Ressources naturelles et des Forêts[j]), ainsi que des publications scientifiques.

Pour chaque ravageur exotique, nous avons relevé le type (insecte ou maladie), les essences hôtes, les effets sur les hôtes, le statut de l'invasion par rapport au Québec et le risque de prolifération dans la zone tempérée nordique. Nous avons ensuite attribué à chaque ravageur un niveau de risque pour une essence donnée :

- élevé pour une essence donnée s'il peut lui causer une mortalité incontrôlable en forêt sur des individus vigoureux et que ce ravageur est déjà présent au Québec ;
- faible s'il n'est pas encore établi de manière permanente en Amérique du Nord ou, s'il l'est depuis plus d'une décennie, alors s'il ne semble pas causer de mortalité des arbres vigoureux jusqu'à présent.

Entre ces deux extrêmes, nous avons attribué trois niveaux intermédiaires (faible à modéré, modéré, modéré à élevé) selon un jugement porté sur l'ensemble des facteurs en jeu, soit :

- l'incertitude entourant les informations disponibles ;
- la distance du front d'invasion par rapport au Québec et à la vitesse de propagation du ravageur ;
- la capacité du ravageur à tolérer des hivers plus rigoureux ;
- l'état des efforts de lutte biologique ;
- les efforts requis pour contrôler localement ce ravageur lorsque c'est possible.

Nous avons ensuite attribué un degré de vulnérabilité à chaque essence, sur la base du niveau maximal de risque posé par le ou les ravageurs qui s'y attaquent. Ce degré de vulnérabilité a été attribué en considérant d'abord les effets potentiels de ces ravageurs sur la survie et la croissance des arbres sur pied, et en second lieu, leurs effets sur la régénération. L'échelle de vulnérabilité compte 5 niveaux : faible, faible à modérée, modérée, modérée à forte, forte.

Quant aux ravageurs indigènes, nous avons posé l'hypothèse que leurs effets étaient captés dans les données observées, sauf pour des exceptions que nous avons relevées dans la discussion.

g https://inspection.canada.ca/protection-des-vegetaux/especes-envahissantes/fra/1299168913252/1299168989280
h https://www.invasivespeciescentre.ca/
i https://www.aphis.usda.gov/plant-pests-diseases
j https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/protection-milieu-forestier/protection-forets-insectes-maladies/

# Chapitre 2 — Résultats

## 2.1 Bouleau jaune

Le volume net total et ceux de bois d'œuvre ou de DF1F2 du bouleau jaune n'augmentent pas autant que le VMB en fonction du DHP de l'arbre (figure 3). D'ailleurs, la proportion de volume net par rapport au VMB atteint un sommet de 93 % à un DHP de 24 cm, puis décline jusqu'à 38 % à un DHP de 68 cm. La tendance est semblable pour la proportion de volume de bois d'œuvre (baisse de 43 % à 11 % dans le même intervalle de DHP), malgré la présence d'un plateau à environ 26 % pour les arbres ayant un DHP de 32 à 50 cm. À titre indicatif, le volume moyen de bois d'œuvre pour un bouleau jaune ayant un DHP de 40 cm est de 0,284 $m^3$. Quant au volume de DF1F2, il atteint un sommet en valeur absolue (0,377 $m^3$) à un DHP d'environ 58 cm, mais en proportion du VMB, il atteint son maximum (18 %) à un DHP d'environ 48 cm. À partir d'un DHP de 24 cm, la proportion de bois d'œuvre par rapport au volume net du bouleau jaune est stable à environ 45 %.

Pour le bouleau jaune, le revenu brut unitaire d'approvisionnement augmente avec le DHP et la classe de qualité de l'arbre, même s'il varie selon la région écologique (figure 4). Les revenus les plus élevés (près de 100-120 $/$m^3$) proviennent des arbres de qualité AB ayant un DHP de 50 à 60 cm et situés dans les régions écologiques les plus centrales de la province selon l'axe est-ouest, soit les régions 3c et 3d, puis 4c (figures 1 et 4). Les bouleaux jaunes de qualité D et ceux de qualité C ayant un plus petit DHP (24 à 46 cm selon la région) offrent pour la plupart un revenu unitaire de 55 à 60 $/$m^3$. On constate des écarts de revenus moindres entre les classes de priorité de récolte CR, S ou M (figure 5) qu'entre les classes de qualité AB, C et D (figure 4). Néanmoins, les revenus provenant des bouleaux jaunes de la classe CR sont généralement supérieurs à ceux des arbres de la classe M, et ceux provenant des arbres de la classe S sont intermédiaires.

Les taux annuels moyens (sur 11 ans) de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre pour les bouleaux jaunes de la classe CR et de qualité AB atteignent leur maximum (de 1 à 3 %) à un DHP initial de 34 à 38 cm, puis tendent à baisser avec l'augmentation du DHP initial (figure 6). Ces taux deviennent nuls, puis négatifs, à partir d'un DHP initial de 48 cm et de 56 cm dans les groupes de régions écologiques 2a3abc et 4abcd, respectivement. Ces valeurs observées servent donc à définir les $DMF_{11\ ans}$ (tableau 3). Le $DMF_{11\ ans}$ du groupe « autres » est moins clairement défini en raison du faible nombre d'observations (28 observations pour un DHP initial de 44 à 54 cm), mais le taux annuel de changement de revenu brut est près de 0 % à partir d'un DHP initial de 42 cm.

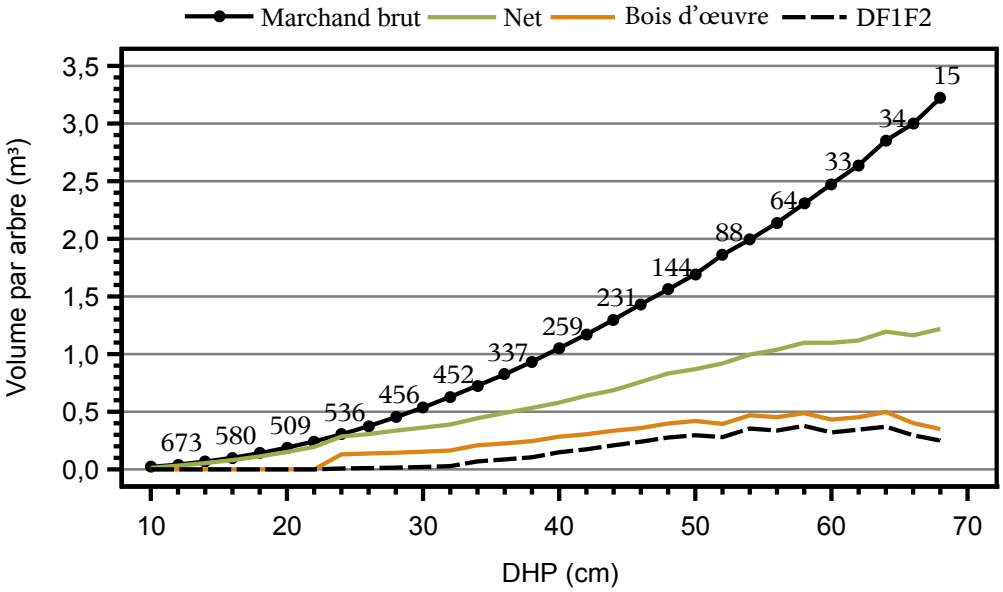


**Figure 3.** Volumes moyens par catégorie de produits en fonction du DHP pour le bouleau jaune au Québec. Les valeurs affichées au-dessus d'un point sur deux de la courbe de volume marchand brut correspondent au nombre d'observations. Marchand brut = volume marchand brut ; Net = volume net ; Bois d'œuvre = volume total de bois d'œuvre ; DF1F2 = volume des billes de qualité déroulage (D) ou de qualité sciage F1 ou F2.

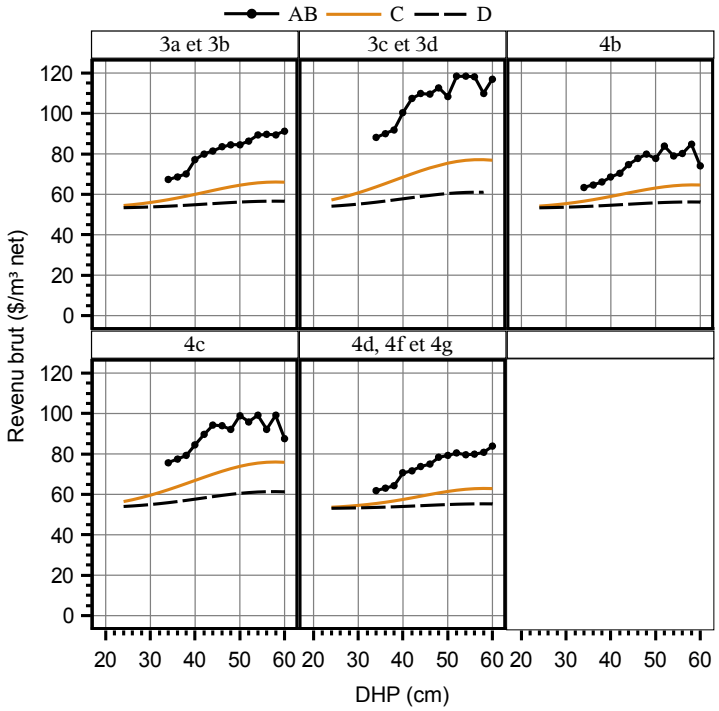


**Figure 4.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour le bouleau jaune, selon la classe de qualité de l'arbre (AB, C ou D) et la région écologique (3a et 3b, 3c et 3d, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk *et al.*, soumis). Notez que certaines courbes ont une forme régulière, car elles sont le résultat direct d'une modélisation. Les courbes pour la classe AB ont une forme plus irrégulière, car chaque point est donné par la moyenne observée de plus d'un résultat de modélisation, soit un mélange variable d'arbres de qualité A et B.

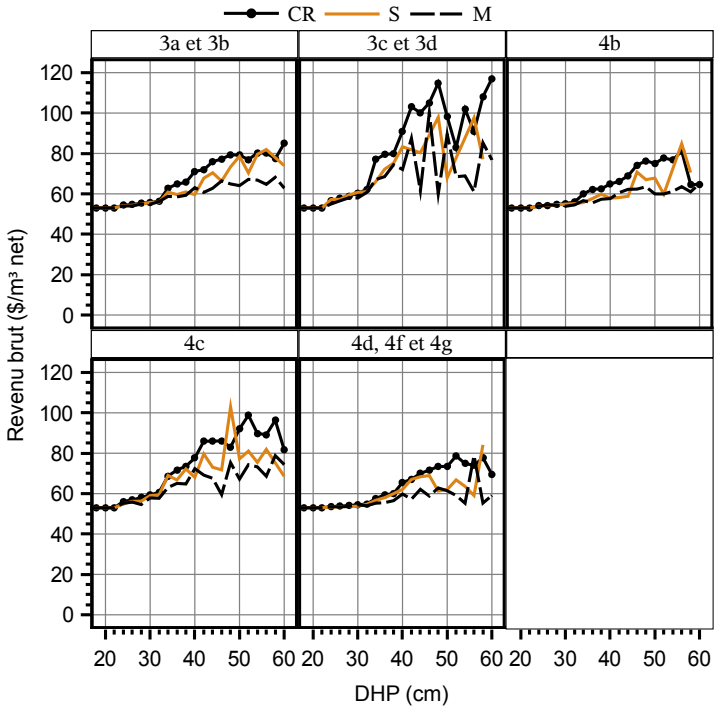


**Figure 5.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour le bouleau jaune, selon la classe de priorité de récolte (CR, S ou M), la région écologique (3a et 3b, 3c et 3d, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk *et al.*, soumis).

**Tableau 3.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de bouleau jaune, selon le groupe de régions écologiques et les classes de qualité des arbres : valeurs observées sur une période moyenne de 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté.

| Groupe de régions écologiques | Classe | $DMF_{11\ ans}$ observé (cm) | | $DMF_{30\ ans}$ projeté (cm) | | Revenu brut au $DMF_{30\ ans}$ projeté ($/m³)* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | |
| 2a3abc | CR-AB | 48 | 34- >54 | 44 | 34->50 | 80-110 |
| | CR-C | >50 | – | >46 | – | 65-75 |
| | CR-ABCD | 52 | 50-54 | 48 | 46-50 | 80-105 |
| 4abcd | CR-AB | 56 | 46-60 | 52 | 42-56 | 80-100 |
| | CR-C | >50 | – | >46 | – | 60-75 |
| | CR-ABCD | 56 | 54-58 | 52 | 50-54 | 70-80 |
| « Autres » | CR-AB | 42 | 34- ?† | 38 | 34- ?† | 70-115 |
| | CR-C | >38 | – | >34 | – | 65-75 |
| | CR-ABCD | >46 | 44- ?† | >42 | 40- ?† | 65 |
| Ensemble de la province | M-AB | 34 | 34-40 | 34 | 34-36 | 60-90 |
| | M-C | 24 | 24-26 | 24 | – | 55 |
| | M-ABCD | 32 | 24-36 | 28 | 24-32 | 55-60 |
| | S-AB | 34 | 34-56 | 34 | 34-52 | 60-90 |
| | S-C | >50 | – | >46 | – | 65-75 |
| | S-ABCD | 56 | 24- ?† | 52 | 24- ?† | 65-95 |

* L'intervalle reflète les différences de revenu brut entre les régions écologiques d'un même groupe (figure 4).
† Aucun DMF n'a été établi puisqu'il n'y avait pas de valeur négative dans l'intervalle de DHP présenté.

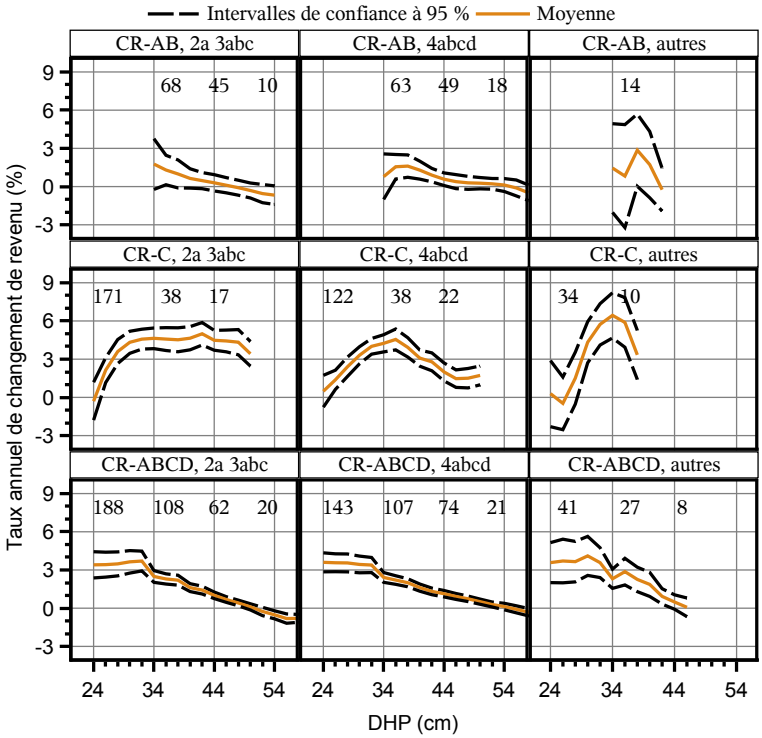


**Figure 6.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour le bouleau jaune de classe CR, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques. Les valeurs affichées au-dessus des courbes correspondent respectivement au nombre d'observations dans les classes de DHP de 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la plus petite classe de DHP pour la classe de qualité en question, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations.

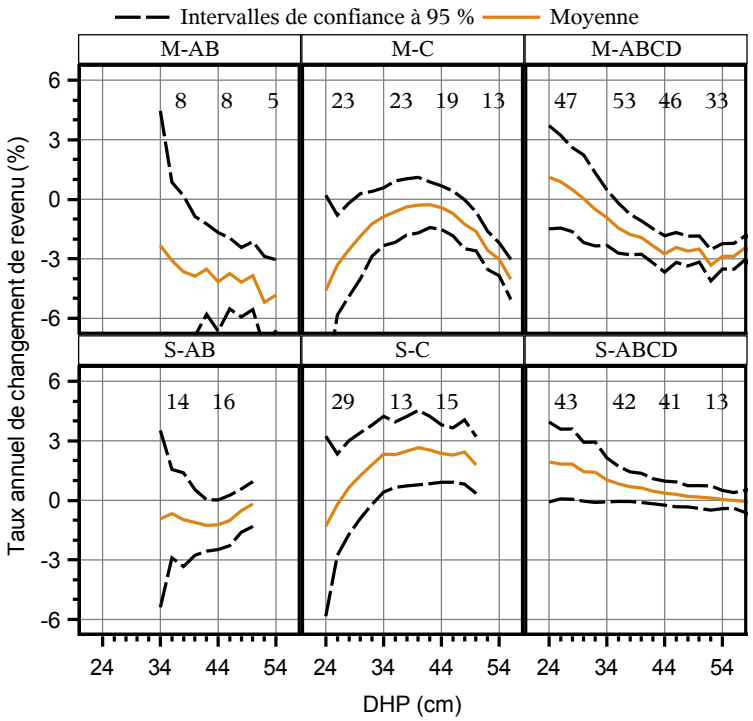


**Figure 7.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour le bouleau jaune de classe M ou S, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD). Les valeurs affichées au-dessus des courbes correspondent respectivement au nombre d'observations dans les classes de DHP de 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la classe de DHP minimale pour la classe d'arbres, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations.

Pour les bouleaux jaunes de la classe CR, les taux annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre sont nettement plus élevés dans la classe de qualité C, atteignant un maximum moyen de près de 6 % pour les arbres ayant un DHP initial de 34 cm dans le groupe de régions écologiques « autres » (figure 6). Des taux de rendement positifs sont observés sur une plus grande étendue de DHP pour les bouleaux jaunes de la classe CR et de qualité C que pour ceux de qualité AB, et il n'est pas possible de définir clairement de $DMF_{11\ ans}$ avec les données disponibles, par manque d'observations sur de plus gros arbres.

Les bouleaux jaunes de la classe CR des 3 groupes de régions écologiques, sans distinction pour la qualité des arbres, ont un taux annuel de changement du revenu brut d'environ 3 % à un DHP initial de 24 à 32 cm (figure 6). Les taux déclinent ensuite avec l'augmentation du DHP initial et deviennent nuls ou négatifs (seuils des $DMF_{11\ ans}$) à 52, 56 ou >46 cm dans les groupes 2a3abc, 4abcd ou « autres », respectivement (tableau 3).

Les bouleaux jaunes de la classe M ou S affichent davantage de taux négatifs de changement annuel de revenu brut pour l'approvisionnement d'une usine (figure 7). Dans la classe M, seuls ceux ayant un DHP initial de 24 à 30 cm ont des taux moyens légèrement positifs lorsque certaines classes de qualité (A, B, C, D) sont regroupées. Dans la classe S, les arbres de qualité AB ont un taux négatif, tandis que ceux de qualité C et ayant un DHP initial de 28 à 50 cm ont des taux positifs atteignant un plateau à une valeur légèrement au-dessus de 2 % à partir d'un DHP initial de 34 cm. Pour tous les bouleaux jaunes de la classe S, sans distinction de classe de qualité, les taux annuels de changement du revenu brut sont d'environ 2 % à des DHP initiaux de 24 à 28 cm. Ils déclinent ensuite avec l'augmentation du DHP et deviennent nuls ou légèrement négatifs (seuil du $DMF_{11\ ans}$) à partir de 56 cm (tableau 3).

Les revenus bruts d'approvisionnement des bouleaux jaunes aux seuils de $DMF_{30\ ans}$ varient de 65 à 115 $/m³ pour les arbres de la classe CR, mais ils sont d'au moins 70 $/m³ dans la plupart des cas (tableau 3). Des revenus plus faibles (de 55 à 95 $/m³) sont observés pour les arbres des classes M et S, notamment parce que la plupart des DMF de ces arbres sont plus petits.

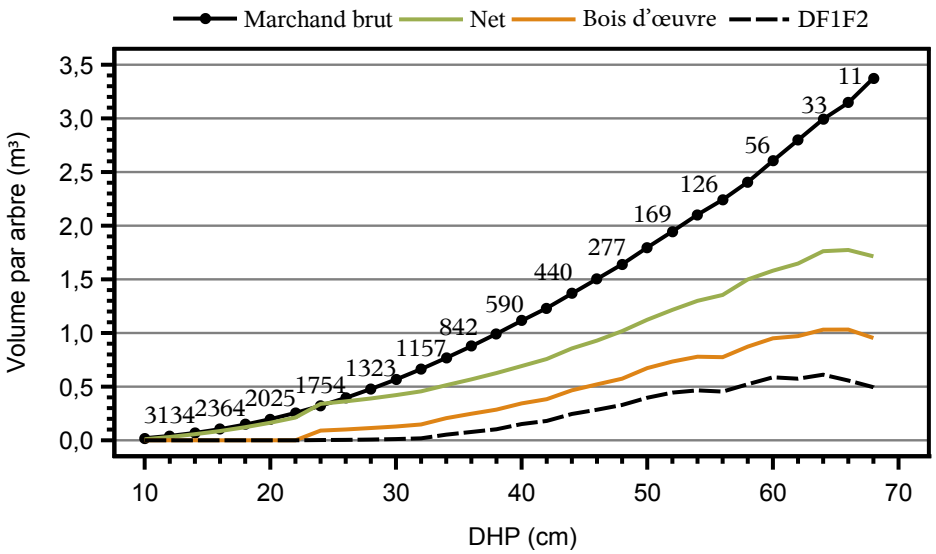


**Figure 8.** Volumes moyens par catégorie de produits en fonction du DHP pour l'érable à sucre au Québec. Les valeurs affichées au-dessus d'un point sur deux de la courbe de volume marchand brut correspondent au nombre d'observations. Marchand brut = volume marchand brut ; Net = volume net ; Bois d'œuvre = volume total de bois d'œuvre ; DF1F2 = volume des billes de qualité déroulage (D) ou de qualité sciage F1 ou F2.

## 2.2 Érable à sucre

Pour l'érable à sucre, le volume net total et ceux de bois d'œuvre ou de DF1F2 n'augmentent pas autant que le VMB en fonction du DHP de l'arbre (figure 8). La proportion de volume net atteint un sommet d'environ 85 % du VMB pour les érables à sucre ayant un DHP ≤ 28 cm, puis se stabilise entre 59 et 63 % pour ceux ayant un DHP de 38 à 64 cm. La tendance est différente pour la proportion du VMB correspondant au bois d'œuvre : un minimum d'environ 25 % est observé pour les arbres ayant un DHP de 24 à 32 cm, puis la proportion augmente graduellement pour atteindre un sommet d'environ 35 % à des DHP de 44 à 66 cm. À titre indicatif, le volume moyen de bois d'œuvre pour un érable à sucre ayant un DHP de 40 cm est de 0,344 m³. Le volume de DF1F2, quant à lui, atteint un sommet en valeur absolue (0,587 m³) à un DHP de 60 cm, mais en proportion du VMB, il atteint son maximum (22 %) à des DHP de 50 à 60 cm. La proportion de bois d'œuvre par rapport au volume net de l'érable à sucre augmente d'un minimum de 27 %, à un DHP de 24 cm, jusqu'à un sommet d'environ 59 % à des DHP de 50 à 66 cm.

Le revenu brut total que procure un volume unitaire d'érable à sucre augmente avec le DHP et la classe de qualité de l'arbre, puis il varie selon la région écologique dans laquelle il se trouve (figure 9). Les revenus les plus élevés (plus de 80 $/m³) sont observés pour les érables à sucre de qualité AB ayant un DHP d'au moins 44 cm et situés dans les régions écologiques des domaines de l'érablière (régions 2a, 3a et 3b), ainsi que dans celles du domaine de la sapinière à bouleau jaune, mais situées dans l'est de la province (régions 4d, 4f et 4g ; figures 1 et 9). Les érables à sucre de qualité D offrent pour la plupart un revenu unitaire de 55 à 65 $/m³, tout comme pour ceux de qualité C et ayant un DHP de 24 à environ 40 cm dans les domaines de l'érablière (régions 2a, 3a et 3b). Cette catégorie de revenus (55 à 65 $/m³) pour les arbres de qualité C s'étend jusqu'à un DHP de 48 cm dans les régions 4d, 4f et 4g, puis jusqu'à 58 cm dans les régions 4b et 4c. On note moins d'écarts de revenu en fonction de la classe de priorité de récolte (CR, S ou M ; figure 10) qu'entre les classes de qualité (AB, C ou D ; figure 9). Notons que les revenus associés aux arbres de la classe CR sont généralement supérieurs à ceux provenant des arbres de la classe M, et que les arbres de la classe S sont dans une situation intermédiaire.

Les taux annuels moyens (sur 11 ans) de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre pour les érables à sucre de la classe de priorité CR varient considérablement selon le DHP initial, la classe de qualité et le groupe de régions écologiques (figure 11). Le territoire du groupe de régions écologiques « autres » présente les meilleurs taux annuels, avec des valeurs maximales de 3 à 6 % selon la qualité des arbres. À l'intérieur d'un même groupe de régions écologiques, ce sont les arbres de qualité AB qui présentent les moins bons taux annuels. Par exemple, les taux maximaux observés dans les groupes 2a3abc, 4abcd et

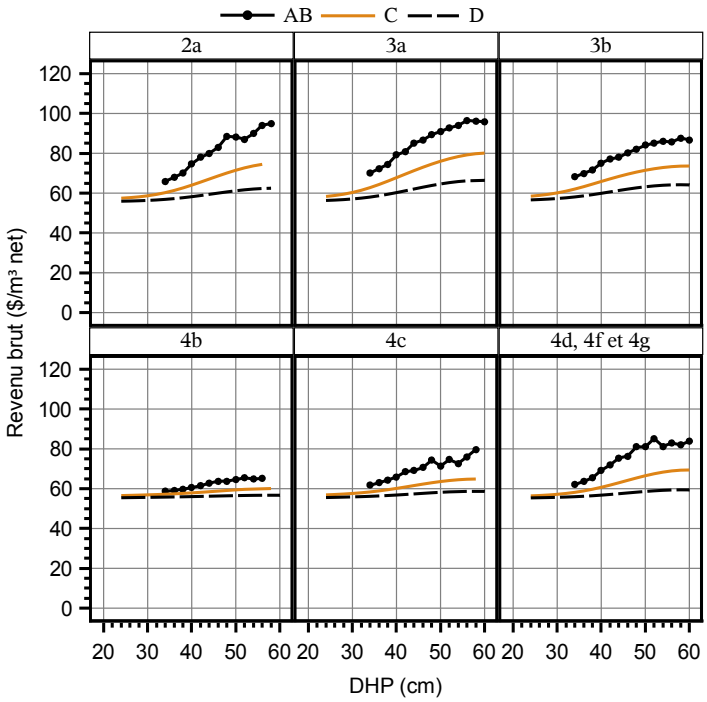


**Figure 9.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour l'érable à sucre, selon la classe de qualité de l'arbre (AB, C ou D) et la région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk *et al.*, soumis). Notez que certaines courbes ont une forme régulière, car elles sont le résultat direct d'une modélisation, tandis que les courbes pour la classe AB ont une forme plus irrégulière, car chaque point est donné par la moyenne observée de plus d'un résultat de modélisation, soit un mélange variable d'arbres de qualité A et B.

« autres » pour les arbres de qualité AB sont à 1,2 %, 2,3 % et 3,2 %, respectivement, alors que pour les arbres de qualité C, ils atteignent 3,6 %, 2,8 % et 6,1 %, respectivement. Les taux maximaux pour le groupement comprenant toutes les classes de qualité (ABCD) sont semblables à celui des arbres de qualité C (environ 3 %), mais ce maximum est atteint à un DHP initial d'environ 24 cm dans le premier cas et de 32 à 36 cm dans le second. Pour 5 des 9 situations présentées à la figure 11, les taux deviennent nuls, puis négatifs, à partir d'un certain DHP initial qui correspond au seuil d'identification du $DMF_{11\ ans}$ (tableau 4). Dans les 4 autres situations, le faible nombre d'observations d'érables à sucre de très grand DHP ne permet pas de capter ce seuil de $DMF_{11\ ans}$.

Quant aux érables à sucre de la classe de priorité de récolte M ou S, ils affichent davantage de taux négatifs de changement annuel de leur revenu brut pour l'approvisionnement d'une usine (figure 12). Dans la classe M, seuls ceux ayant un DHP initial de 24 à 28 cm ont des taux moyens légèrement positifs lorsque toutes les classes de qualité (ABCD) sont regroupées. Dans la classe S, ceux de qualité AB ont un taux négatif pour la plupart des DHP, et ceux de qualité C avec un DHP initial de 26 à 44 cm ont des taux légèrement positifs (0,6 %). Pour tous les érables à sucre appartenant à la classe S, sans distinction pour la qualité des arbres, les taux annuels de changement du revenu brut sont d'environ 2 % pour un DHP initial de 24 à 26 cm. Ils déclinent ensuite avec l'augmentation du DHP initial et deviennent nuls ou légèrement négatifs (seuil du $DMF_{11\ ans}$) à partir de 44 cm (tableau 4).

Le revenu moyen des érables à sucre de la classe CR dont le DHP est près du seuil de $DMF_{30\ ans}$ varie de 60 à 90 $/m³, mais il est d'au moins 65 $/m³ dans la plupart des cas (tableau 4). Des revenus plus faibles (soit de 55 à 75 $/m³) sont observés pour les arbres des classes M et S, notamment parce que la plupart des DMF de ces arbres sont plus petits. Notons aussi que les revenus tout aussi faibles (soit de 60 à 70 $/m³) sont observés aux seuils de tous les $DMF_{30\ ans}$ dans le groupe 4abcd.

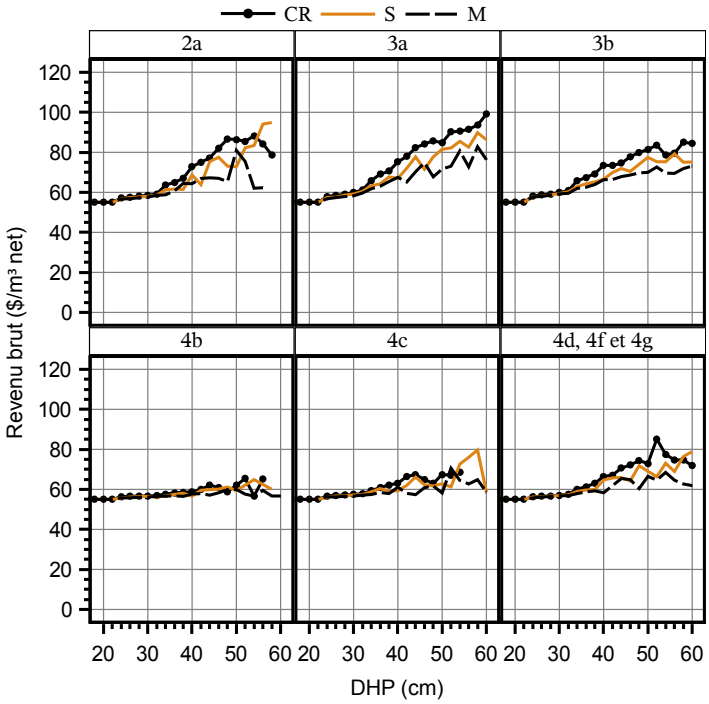


**Figure 10.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie en fonction du DHP pour l'érable à sucre, selon la classe de priorité de récolte (CR, S ou M), la région écologique (2a, 3a, 3b, 4b, 4c, puis le regroupement de 4d, 4f et 4g, conformément à Havreljuk et al., soumis) et le DHP.

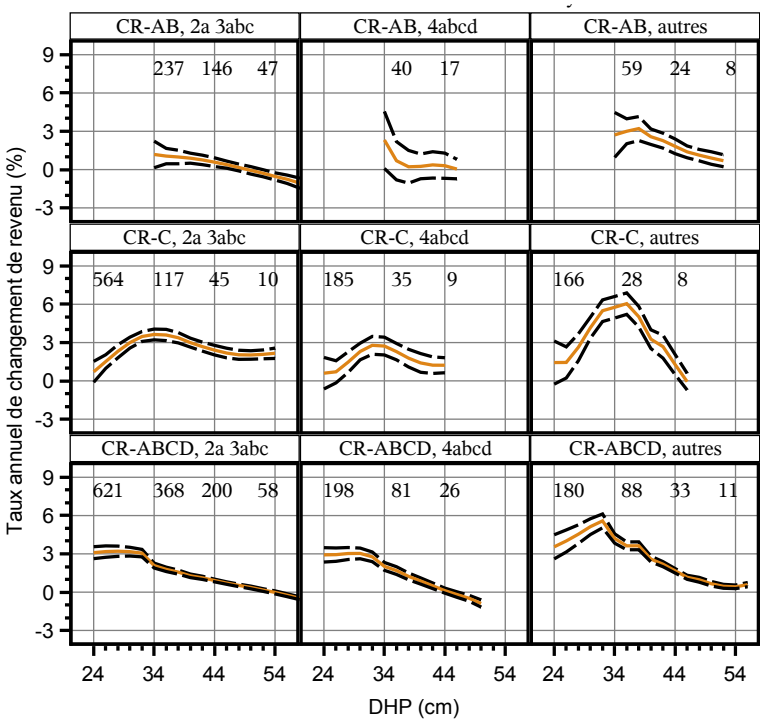


**Figure 11.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour l'érable à sucre de classe CR, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques. Les valeurs affichées au-dessus des courbes correspondent respectivement au nombre d'observation dans les classes de DHP de 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la classe de DHP minimale pour la classe d'arbres, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations.

**Tableau 4.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre d'érable à sucre, selon le groupe de régions écologiques et la classe de qualité des arbres : valeurs observées sur une période moyenne de 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté.

| Groupe de régions écologiques | Classe | $DMF_{11\ ans}$ observé (cm) | | $DMF_{30\ ans}$ projeté (cm) | | Revenu brut au $DMF_{30\ ans}$ projeté ($/m³)* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | |
| 2a3abc | CR-AB | 50 | 48-52 | 46 | 44-48 | 80-85 |
| | CR-C | >54 | – | >50 | – | 70-80 |
| | CR-ABCD | 54 | 54-56 | 50 | 50-52 | 80-90 |
| 4abcd | CR-AB | 48 | 36-52 | 44 | 34-48 | 60-70 |
| | CR-C | >44 | – | >40 | – | 60-65 |
| | CR-ABCD | 46 | 44-48 | 42 | 40-44 | 60-70 |
| « Autres » | CR-AB | >52 | – | >48 | – | 85-90 |
| | CR-C | 46 | 46- ?† | 42 | 42- ?† | 65-70 |
| | CR-ABCD | >56 | – | >52 | – | 75-85 |
| Ensemble de la province | M-AB | 34 | 34-36 | 34 | – | 60-70 |
| | M-C | 24 | 24-38 | 24 | 24-34 | 55-60 |
| | M-ABCD | 30 | 26-34 | 26 | 24-30 | 55-60 |
| | S-AB | 38 | 34-46 | 34 | 34-42 | 60-70 |
| | S-C | 48 | 24-50 | 44 | 24-46 | 60-75 |
| | S-ABCD | 44 | 40-46 | 40 | 36-42 | 60-70 |

* L'intervalle reflète les différences de revenu brut entre les régions écologiques d'un même groupe (figure 9).
† Aucun DMF n'a été établi puisqu'il n'y avait pas de valeur négative dans l'intervalle de DHP présenté.

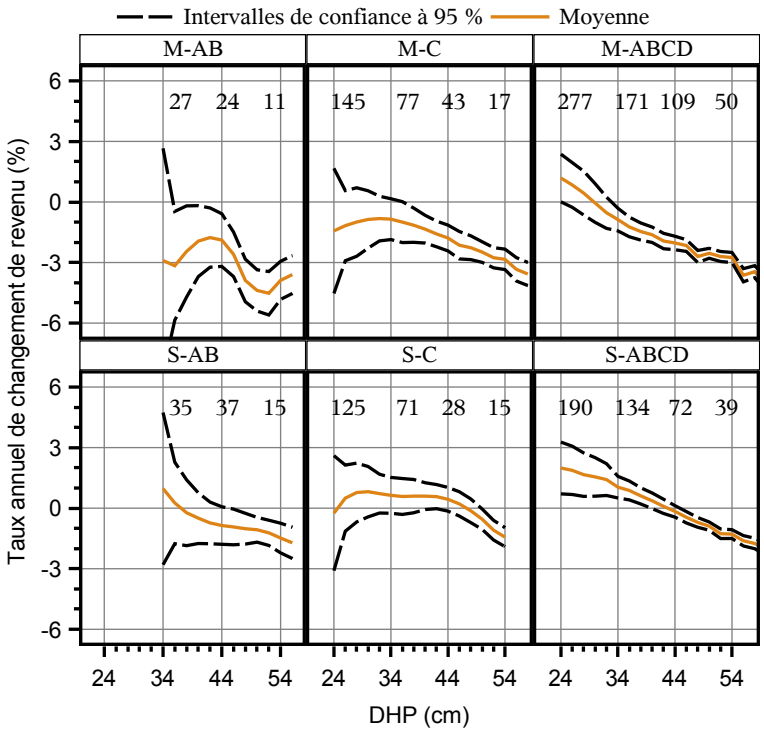


**Figure 12.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour l'érable à sucre de classe M ou S, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou toutes qualités ABCD). Les valeurs affichées au-dessus des courbes correspondent respectivement au nombre d'observations dans les classes de DHP de 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la classe de DHP minimale pour la classe d'arbres, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations.

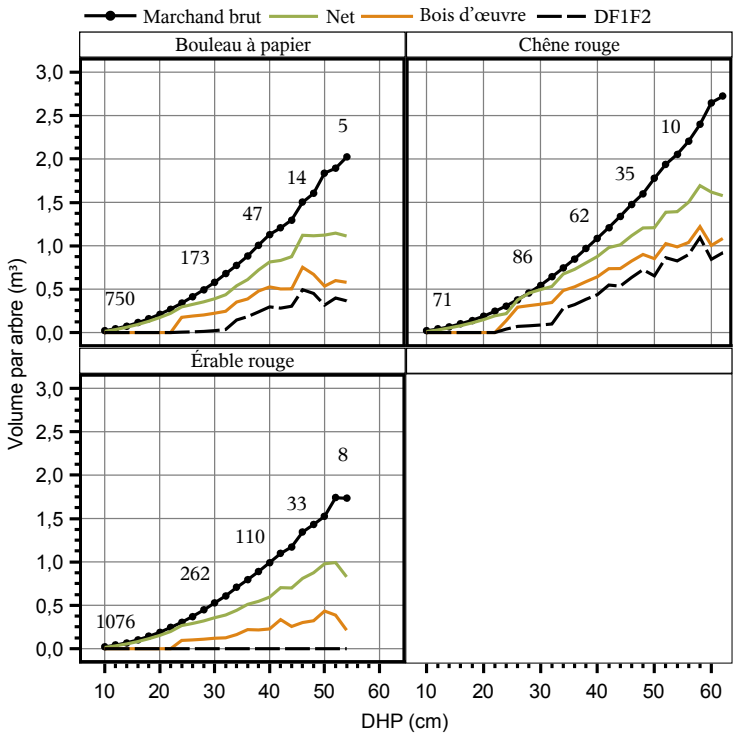


**Figure 13.** Volumes moyens par catégorie de produits en fonction du DHP pour le bouleau à papier, le chêne rouge et l'érable rouge au Québec. Les valeurs affichées au-dessus des courbes représentent respectivement le nombre d'observations dans les classes de DHP de 12, 26, 36, 44 et 52 cm. Marchand brut = volume marchand brut ; Net = volume net ; Bois d'œuvre = volume total de bois d'œuvre ; DF1F2 = volumes des billes de qualité déroulage (D) ou de qualité sciage F1 ou F2.

### 2.3 Autres essences feuillues

Pour le bouleau à papier, le chêne rouge et l'érable rouge, le volume net total et ceux de bois d'œuvre ou de DF1F2 n'augmentent pas autant que le VMB selon le DHP de l'arbre (figure 13). Pour ces trois essences, la proportion de volume net par rapport au VMB atteint son sommet (de 87 à 91 %) chez les arbres ayant un DHP d'environ 24 cm. Cette proportion se stabilise à environ 65 à 70 % pour les arbres ayant un DHP de 26 à 48 cm chez le bouleau à papier et l'érable rouge et pour les arbres ayant un DHP de 50 à 58 cm chez le chêne rouge. À partir d'un DHP de 24 cm, la proportion de bois d'œuvre dans le volume net est relativement stable dans l'intervalle des DHP étudiés, soit environ 61 % pour le bouleau à papier, 71 % pour le chêne rouge et 38 % pour l'érable rouge. À titre indicatif, le volume moyen de bois d'œuvre pour un arbre ayant un DHP de 40 cm est de 0,526 m³ pour le bouleau à papier, de 0,643 m³ pour le chêne rouge et de 0,228 m³ pour l'érable rouge.

Pour le peuplier faux-tremble et le peuplier à grandes dents, le modèle intégré dans l'outil MÉRIS prédit directement un volume net de 83 % du VMB pour les arbres ayant un DHP de 10 cm, de 90 % du VMB pour ceux ayant un DHP de 12 à 22 cm et de 87 % du VMB pour ceux ayant un DHP de 24 cm et plus, et ce, indépendamment de la qualité du tronc ou de la région écologique.

Rappelons que pour le cerisier tardif et le tilleul d'Amérique, les volumes par produits sont ceux des modèles utilisés pour le chêne rouge (figure 13) et le bouleau jaune (figure 3), respectivement (voir la section 1.2).

Pour le bouleau à papier, le revenu brut total que procure un volume dans l'approvisionnement d'une usine suit approximativement deux plateaux : l'un à 51 $/m³ pour les arbres ayant un DHP de 10 à 32 cm, puis un autre à environ 62 $/m³ pour les arbres plus gros (figure 14). Pour le chêne rouge, le revenu brut total atteint un plateau à environ 87 $/m³ pour les arbres ayant un DHP de 24 à 32 cm, puis il augmente rapidement avec le DHP jusqu'à atteindre environ 133 $/m³ pour ceux ayant un DHP de 46 à 58 cm. Pour le cerisier tardif, bien que la répartition par produits et les revenus bruts des produits soient estimés à partir des informations disponibles pour le chêne rouge, le revenu brut augmente moins rapidement à cause d'une plus forte proportion

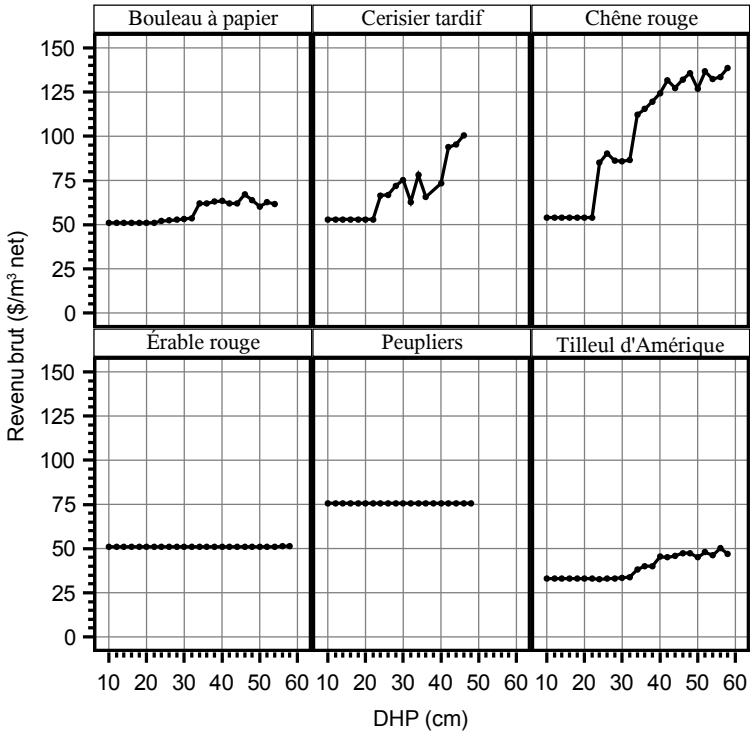


**Figure 14.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie au Québec selon le DHP pour le bouleau à papier, le cerisier tardif, le chêne rouge, l'érable rouge, les peupliers (le peuplier faux-tremble et le peuplier à grandes dents) et le tilleul d'Amérique.

de tiges de qualité moindre. Pour un cerisier tardif ayant un DHP de 28 à 40 cm, le revenu brut moyen est de 71 $/m$^3$. Pour l'érable rouge, les peupliers (peuplier faux-tremble et peuplier à grandes dents), les revenus bruts ne varient pas selon le DHP de l'arbre. Finalement, pour le tilleul d'Amérique, le revenu brut augmente légèrement à partir d'un DHP de 34 cm, passant de 33 $/m$^3$ à environ 45 $/m$^3$.

Les taux annuels moyens (sur 11 ans) de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre dépassent 3 % pour les cerisiers tardifs, les chênes rouges et les érables rouges ayant les plus petits DHP initiaux (soit près de 24 à 26 cm) ainsi que pour les tilleuls d'Amérique ayant un DHP de 32 cm (figure 15). Pour le cerisier tardif, le nombre d'observations d'arbres ayant un DHP initial > 28 cm est insuffisant pour identifier le $DMF_{11\ ans}$ (tableau 5). Pour le chêne rouge, le taux annuel de changement du revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre diminue avec le DHP initial, mais il est relativement stable dans l'intervalle de DHP de 42 à 54 cm (toujours positif, à un peu moins de 1 % par année). Pour l'érable rouge, ce taux diminue rapidement avec l'augmentation du DHP initial, devenant négatif à partir d'un DHP de 34 cm pour l'ensemble de la province et à partir d'un DHP de 40 cm dans le sous-ensemble situé au sud de 45,25° de latitude Nord. Quant au tilleul, son taux de changement de revenu brut atteint un sommet à un DHP initial de 32 cm, puis il décline à près de 0 % à un DHP de 48 cm.

Pour le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble et le peuplier à grandes dents, les taux annuels moyens de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre sont fréquemment négatifs ou presque nuls (figure 15). Entre autres, les taux des courbes des intervalles inférieurs de confiance sont entièrement négatifs ou nuls. Les taux moyens maximaux observés à partir d'un DHP initial de 20 cm sont de 0,3 % pour le bouleau à papier, de 0,4 % pour le peuplier faux-tremble et de 1,6 % pour le peuplier à grandes dents, avec des $DMF_{11\ ans}$ correspondants de 30 cm, de 30 cm et de 38 cm, respectivement (tableau 5).

## 2.4 Essences résineuses

Pour les essences résineuses, la proportion moyenne du VMB représentée par le volume net augmente avec le DHP et se stabilise à partir d'un

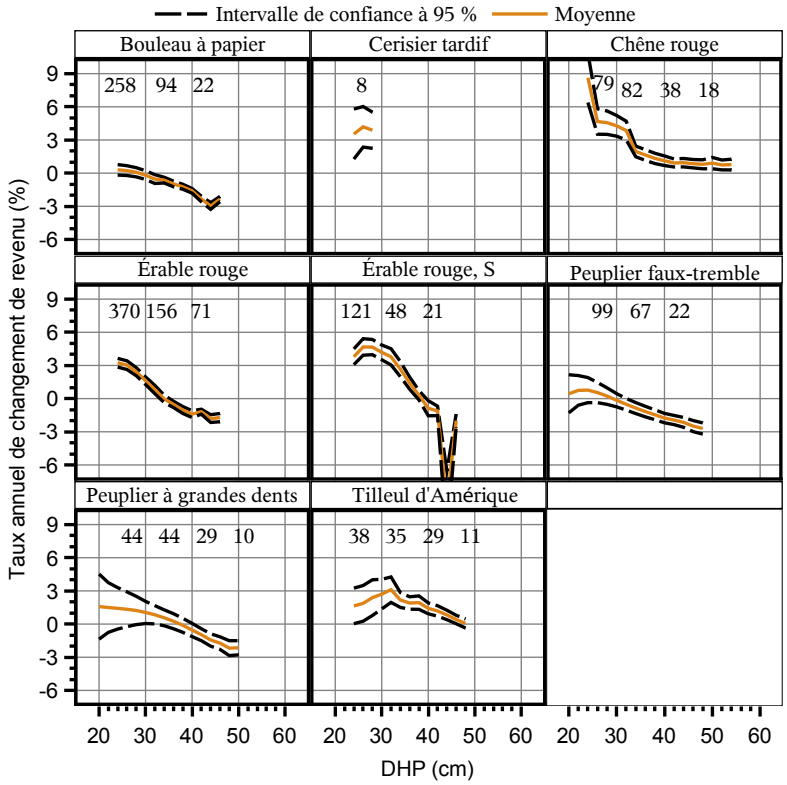


**Figure 15.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans selon le DHP initial pour le bouleau à papier, le cerisier tardif, le chêne rouge, l'érable rouge (tous et ceux au sud de 46,25° de latitude N [lettre S]), le peuplier faux-tremble, le peuplier à grandes dents et le tilleul d'Amérique au Québec. Les valeurs affichées au-dessus des courbes représentent respectivement le nombre d'observations dans les classes de DHP de 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la classe de DHP minimale pour la classe d'arbres, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations.

**Tableau 5.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalle de confiance) pour le bois d'œuvre de 7 essences feuillues : valeurs observées sur une période moyenne d'environ 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté. Pour l'érable rouge, une seconde évaluation a été faite pour le sous-ensemble des arbres situés au sud (S) de 46,25° de latitude Nord.

| Essence | $DMF_{11\ ans}$ observé (cm) | | $DMF_{30\ ans}$ projeté (cm) | | Revenu brut au $DMF_{30\ ans}$ projeté ($/m³)* |
|---|---|---|---|---|---|
| | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | |
| Bouleau à papier | 30 | 24-32 | 26 | 24-28 | 50 |
| Cerisier tardif | >28 | – | >24 | – | 65-75 |
| Chêne rouge | >54 | – | >50 | – | 125-140 |
| Érable rouge | 34 | 34-36 | 30 | 30-32 | 50 |
| Érable rouge (S) | 40 | 38-40 | 36 | 34-36 | 50 |
| Peuplier faux-tremble | 30 | 10-34 | 26 | 10-30 | 75 |
| Peuplier à grandes dents | 38 | 10-42 | 34 | 10-38 | 75 |
| Tilleul d'Amérique | >48 | 48- ?† | >44 | 44- ?† | 45-50 |

* L'intervalle reflète les différences de revenu brut entre les régions écologiques d'un même groupe.
† Aucun DMF n'a été établi puisqu'il n'y avait pas de valeur négative dans l'intervalle de DHP présenté.

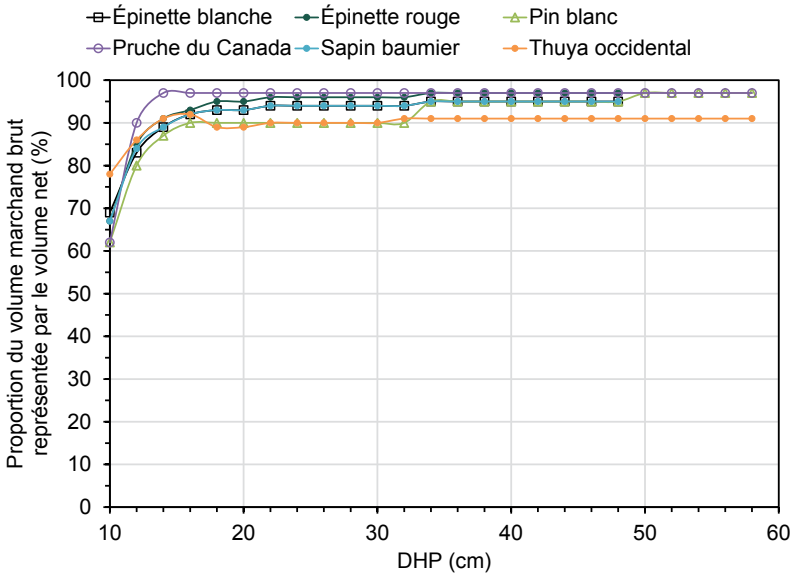


**Figure 16.** Proportion moyenne du volume marchand brut représentée par le volume net pour 6 essences résineuses, selon le DHP.

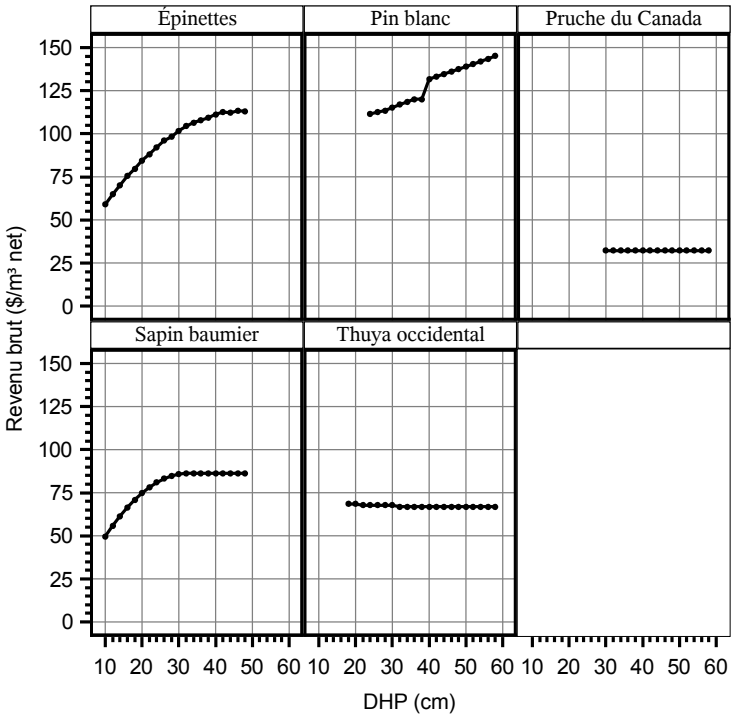


**Figure 17.** Revenu brut unitaire d'approvisionnement de l'industrie selon le DHP pour les épinettes (l'épinette blanche et l'épinette rouge), le pin blanc, la pruche du Canada, le sapin baumier et le thuya occidental.

DHP de 14 à 18 cm, selon l'essence (figure 16). À titre indicatif, le volume net moyen pour un arbre ayant un DHP de 40 cm varie de 0,712 m³ pour le sapin baumier à 1,218 m³ pour le pin blanc.

Le revenu brut total que procure un volume de bois résineux dans l'approvisionnement d'une usine débute à 59 $/m³ pour l'épinette blanche et l'épinette rouge ou à 50 $/m³ pour le sapin baumier; il augmente ensuite avec le DHP de l'arbre jusqu'à atteindre un plateau à environ 112 $/m³ à partir d'un DHP de 42 cm pour l'épinette blanche et l'épinette rouge, et à environ 86 $/m³ à partir d'un DHP de 32 cm pour le sapin baumier (figure 17). Pour le pin blanc, le revenu brut augmente de manière assez régulière, passant de 112 $/m³ (DHP de 24 cm) à 145 $/m³ (DHP de 58 cm). Pour la pruche du Canada et le thuya occidental, le revenu brut ne change pas selon le DHP de l'arbre : ils sont de 32 $/m³ pour les pruches ayant un DHP d'au moins 30 cm et de 67 $/m³ pour les thuyas ayant un DHP d'au moins 18 cm.

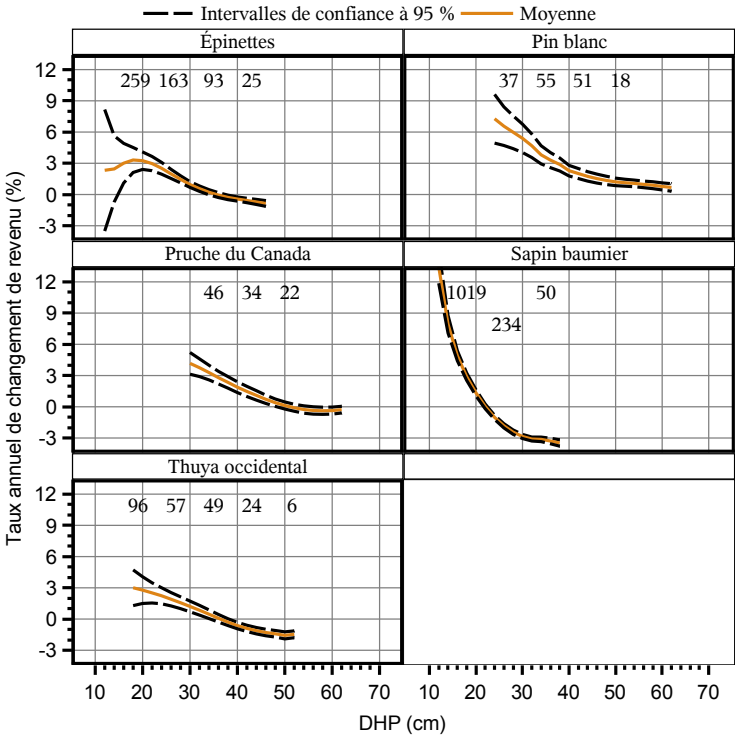


**Figure 18.** Taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (moyenne provinciale et intervalles de confiance à 95 %) sur une période de 11 ans en fonction du DHP initial pour les épinettes (épinettes blanche et rouge), le pin blanc, la pruche du Canada, le sapin baumier et le thuya occidental au Québec. Les valeurs affichées au-dessus des courbes représentent respectivement le nombre d'observations dans les classes de DHP de 18, 26, 36, 44 et 52 cm (lorsqu'applicable). Les courbes débutent à la classe de DHP minimale pour la classe d'arbres, puis se terminent au dernier DHP avant qu'il y ait moins de 30 observations.

**Tableau 6.** Diamètres à maturité financière (DMF ; moyenne et intervalles de confiance) pour le bois d'œuvre des essences résineuses : valeurs observées sur une période moyenne d'environ 11 ans ($DMF_{11\ ans}$), puis projetées sur une période de 30 ans ($DMF_{30\ ans}$), et revenu brut d'approvisionnement à ce DMF projeté.

| Essence | $DMF_{11\ ans}$ observé (cm) | | $DMF_{30\ ans}$ projeté (cm) | | Revenu brut au $DMF_{30\ ans}$ projeté ($/m³)* |
|---|---|---|---|---|---|
| | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | Moyenne | Intervalle de confiance à 95 % | |
| Épinette blanche et épinette rouge | 36 | 34 à 38 | 32 | 30 à 34 | 105 |
| Pin blanc | >62 | – | >58 | – | 145 |
| Pruche du Canada | 52 | 50 à 54 | 48 | 46 à 50 | 32 |
| Sapin baumier | 24 | 22 à 24 | 20 | 18 à 24 | 75 |
| Thuya occidental | 38 | 36 à 40 | 34 | 34 à 36 | 67 |

Les sapins baumiers de petit DHP affichent de loin les meilleurs taux moyens annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre, soit 32 % pour un arbre ayant un DHP initial de 10 cm (donnée non présentée) et 13 % pour un arbre ayant un DHP initial de 12 cm (figure 18). Cependant, le sapin baumier est aussi l'essence dont le taux de changement décline le plus rapidement, pour atteindre 0,03 % à un DHP initial de 22 cm.

Pour le pin blanc, le taux de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre est d'au moins 6 % par année pour les arbres ayant un DHP initial de 24 à 28 cm. Il décline lentement pour atteindre 0,7 % pour les arbres ayant un DHP initial de 62 cm. Les épinettes, la pruche et le thuya ont des taux de changement de revenu brut maximaux d'environ 3 % pour les arbres à l'étude ayant les plus petits DHP. Les $DMF_{11\ ans}$ sont de 36 cm pour les épinettes, de 52 cm pour la pruche, de 24 cm pour le sapin et de 38 cm pour le thuya (tableau 6).

## 2.5 Analyse de sensibilité

Pour le bouleau jaune (figure 19) et l'érable à sucre (figure 20) de la classe de priorité CR, les résultats des 6 analyses de sensibilité du taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre vont tous sensiblement dans le même sens pour les 3 groupes de régions écologiques. Ils varient cependant selon la classe initiale de qualité des arbres (AB, C ou ABCD), puis dans certains cas, selon leur DHP initial.

Ce sont les simulations de changement d'une classe de qualité qui créent les plus grands écarts avec le modèle original, particulièrement pour les arbres qui étaient initialement de qualité C et qui peuvent soit baisser à la classe D ou sinon monter à la classe B, voire parfois jusqu'à la classe A. Notons d'abord que dans tous les cas, une baisse simulée de la classe de qualité entraîne des taux de rendement négatifs et inférieurs au modèle original. Ainsi, les DMF associés à cette analyse sont tous égaux au DHP minimal de la classe de qualité (24 ou 34 cm, selon le cas). Ensuite, les arbres de qualité C pour lesquels nous avons simulé une augmentation de qualité présentent des taux de rendement atteignant jusqu'à 11,5 et 7,7 points de pourcentage de plus que le modèle original pour le bouleau jaune et l'érable à sucre, respectivement. Les augmentations les plus fortes sont celles des arbres ayant un DHP initial de 34 cm et plus. Il n'y a pas de changement notable de taux pour les arbres de qualité C ayant un DHP initial de 24 à 26 cm au début de la période de croissance (voire jusqu'à 28 cm pour l'érable à sucre). Les gains dans le taux de changement de revenu sont faibles (de 0,5 à 2,2 points de pourcentage de plus que le modèle original) pour les arbres de la classe regroupée de qualité AB. Pour toutes les classes de qualité confondues (ABCD), une augmentation de qualité engendre une augmentation de taux mitoyenne entre la valeur initiale des arbres de qualité C et celle des arbres de qualité AB (gain maximal de 5,3 points de pourcentage). Dans l'étendue des DHP initiaux que nous avons étudiés (figures 19 et 20), aucune simulation d'augmentation de classe de qualité pour tous les arbres (lorsque possible) n'entraîne la détection d'un $DMF_{11\ ans}$ : tous les modèles ont des taux annuels de changement non négatifs à des DHP initiaux de 28 cm et plus.

Une hausse simulée de 2 cm de la croissance en DHP et une augmentation de 10 % du prix du panier de produits entraînent des variations similaires du taux annuel de changement de revenu, et ce, pour les 3 groupes de classes de qualité (AB, C ou ABCD ; figures 19 et 20). De même, les réductions simulées équivalentes (diminution de 2 cm de la croissance en DHP ou diminution de 10 % du prix du panier de produits) entraînent des tendances comparables entre elles. En effet, tant pour le bouleau jaune que pour l'érable à sucre, une diminution de 2 cm de la croissance ou une réduction des prix futurs de 10 % entraîne une réduction du taux annuel de changement de revenu allant jusqu'à 2 points de pourcentage par rapport au modèle original. Ces deux modifications au modèle original entraînent aussi des diminutions comparables du DMF pour les groupes de qualité AB et ABCD (résultats non présentés). Cependant, l'ampleur de la diminution du DMF varie selon le groupe de régions écologiques : de 8 à 14 cm pour la plupart des arbres du groupe 2a3abc, et de 4 à 14 cm pour ceux du groupe 4abcd. Dans le groupe des autres régions écologiques, ces deux modifications font apparaître des DMF (allant de 42 cm à 48 cm) pour des combinaisons n'ayant pas de DMF dans le modèle original.

Pour les deux essences, l'augmentation de 10 % des prix futurs améliore de 0,8 à 1,9 point de pourcentage le taux annuel de changement de revenu par rapport au modèle original. Cette amélioration repousse tellement les DMF que 7 des 10 DMF du modèle original ne sont plus perceptibles dans l'intervalle des DHP à l'étude.

Quant à elle, l'amélioration de la croissance en DHP de 2 cm sur la période à l'étude augmente le taux de rendement du bouleau jaune de 0 à 2,4 points de pourcentage et celui de l'érable à sucre, de 0,5 à 3,6 points de pourcentage. Quatre des 10 DMF du modèle original ne sont pas perceptibles dans l'intervalle des DHP à l'étude à la suite de cette modification ; les autres augmentent de 2 cm dans le groupe 4abcd, et de 4 à 8 cm dans le groupe 2a3abc.

## 2.6 Vulnérabilité des essences aux changements anticipés

Les prévisions de Périé *et al.* (2014) et de Prasad *et al.* (2020) au sujet des changements attendus à l'habitat actuel concordent bien pour 13 des 17 essences de la zone tempérée nordique communes à ces deux études (tableau 7). Les 4 exceptions sont des essences ayant une perspective plutôt négative selon Périé *et al.* (2014).

Pour 6 essences, la perspective de changement de l'habitat actuel est positive dans la zone tempérée nordique : le chêne rouge, le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana* L.), le frêne rouge (*Fraxinus pennsylvanica* Marshall), l'orme d'Amérique (*Ulmus americana* L.), le noyer cendré (*Juglans cinerea* L.) et le noyer noir (*Juglans nigra* L.) (tableau 7).

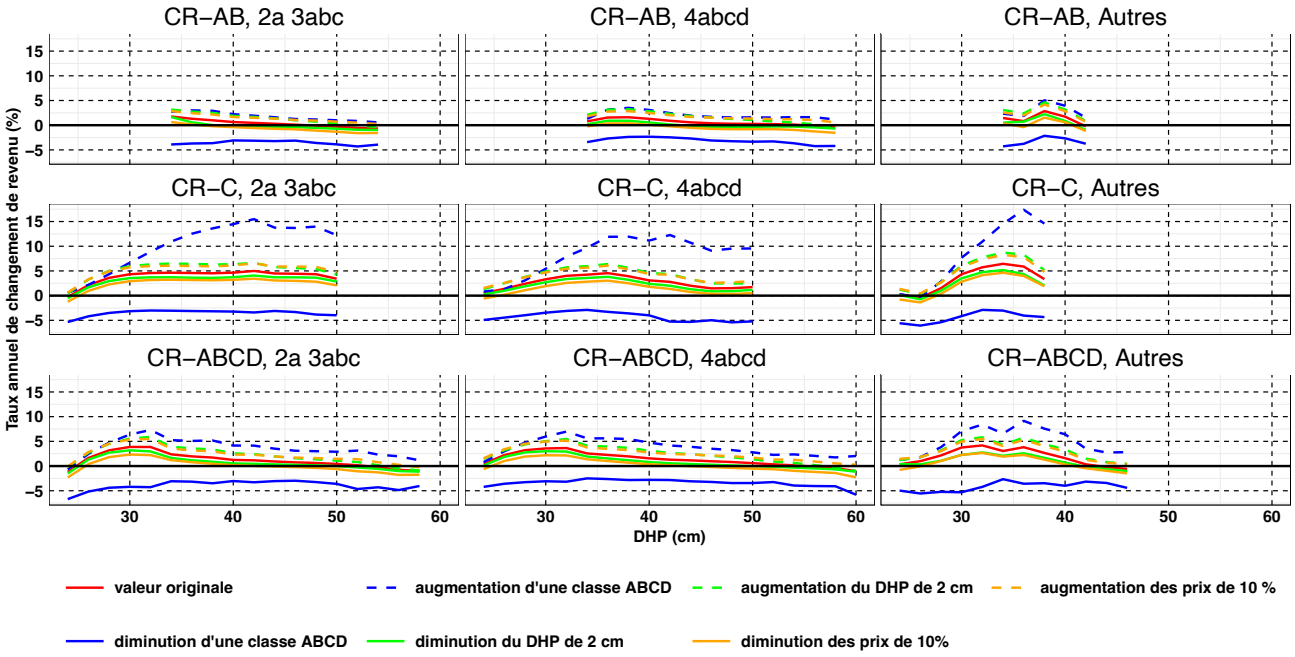


**Figure 19.** Taux annuel moyen de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre en fonction du DHP initial pour le bouleau jaune de classe CR, selon la classe de qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques, en comparant 6 analyses de sensibilité à la courbe étalonnée avec les valeurs d'origine.

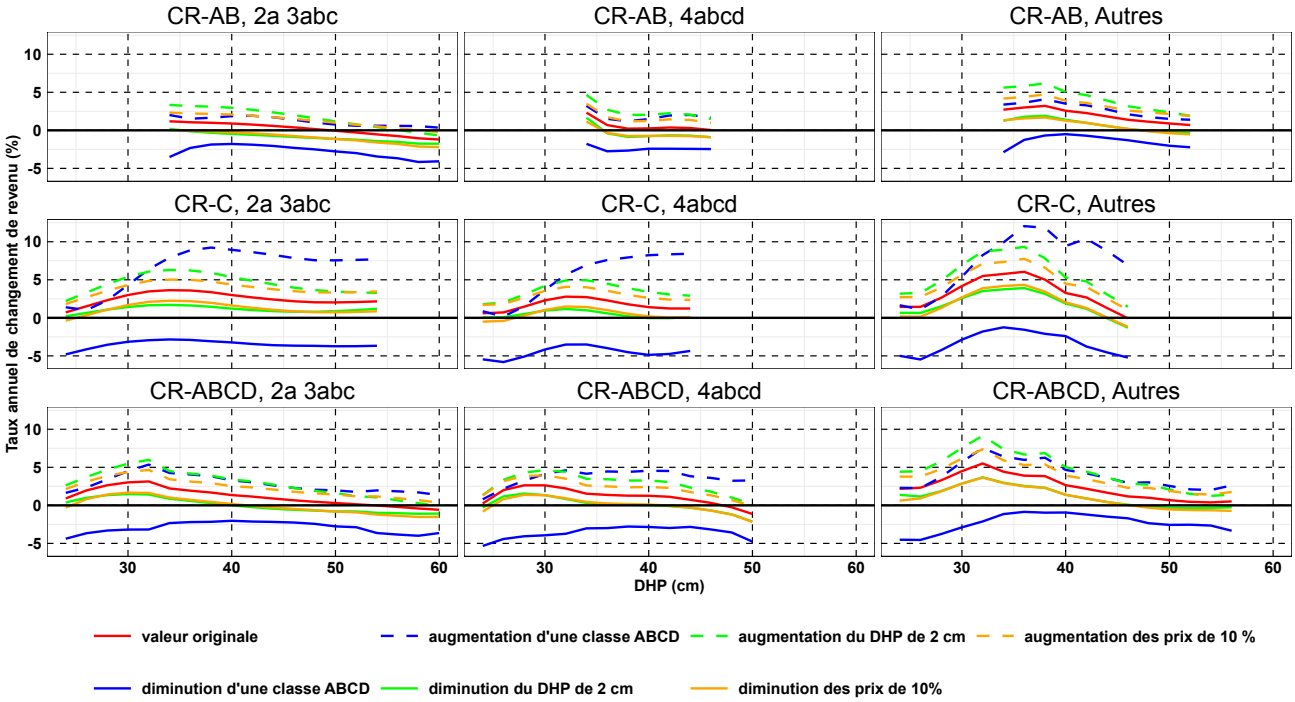


**Figure 20.** Taux annuel moyen de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre en fonction du DHP initial pour l'érable à sucre de classe CR, selon la qualité de l'arbre sur pied (AB, C ou ABCD) et le groupe de régions écologiques, en comparant 6 analyses de sensibilité à la courbe étalonnée avec les valeurs d'origine.

Ces essences sont peu abondantes en milieu forestier dans la zone à l'étude (données non présentées). De plus, 5 d'entre elles ont une forte vulnérabilité aux ravageurs exotiques. Seul le chêne rouge présente une vulnérabilité de modérée à forte à cause de la progression du flétrissement du chêne vers le Québec (annexe).

Pour 6 autres essences, la perspective de modification de l'habitat face aux changements climatiques anticipés est plutôt neutre : le cerisier tardif, l'érable à sucre, l'érable rouge, le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrhart), l'ostryer de Virginie (*Ostrya virginiana* (Mill.) K. Koch) et le tilleul d'Amérique (tableau 7). De celles-ci, seul le hêtre présente une forte vulnérabilité face aux ravageurs exotiques, principalement à cause de la maladie corticale du hêtre qui est présente au Québec, mais aussi à cause de la maladie du feuillage du hêtre qui est présente dans le sud de l'Ontario et dans des États limitrophes du Québec (annexe).

Pour les 12 autres essences, la perspective de modification de l'habitat face aux changements climatiques anticipés est plutôt négative (tableau 7). À l'exception du frêne noir (*Fraxinus nigra* Marshall) et de la pruche du Canada, toutes ces essences sont faiblement à modérément vulnérables aux ravageurs exotiques.

Nous avons relevé 6 éléments moins cohérents entre les deux études en rapport avec les changements anticipés à leurs habitats ou avec leur capacité à résister à la sécheresse. D'abord, bien que la capacité de l'épinette blanche à résister à la sécheresse soit qualifiée de moyenne à forte par Boisvert-Mars *et al.* (2020), la grande majorité de l'habitat de cette espèce est susceptible de lui devenir défavorable, et l'autre partie de son habitat est susceptible de lui devenir moins favorable (Périé *et al.* 2014). Ensuite, pour l'épinette rouge, le peuplier faux-tremble, le pin blanc et le sapin baumier, les perspectives sont plutôt négatives selon Périé *et al.* (2014), mais l'étude de Prasad *et al.* (2020) prévoit plutôt un maintien de l'habitat. Notons que la capacité du pin blanc à résister à la sécheresse est qualifiée de moyenne à forte, ce qui est soutenu par le modèle de Prasad *et al.* (2020). Pour le pin rouge (*Pinus resinosa* Aiton), pourtant reconnu pour sa forte capacité à résister à la sécheresse (Boisvert-Marsh *et al.* 2020), le modèle de Périé *et al.* (2014) prédit d'importantes pertes d'habitat, ou une détérioration de celui-ci.

Finalement, notons que dans l'aire de répartition d'une essence, les risques de mésadaptation sont surtout associés aux endroits les plus chauds, tandis que les habitats susceptibles de devenir plus favorables correspondent aux endroits les plus frais.

**Tableau 7.** Évaluation selon Périé *et al.* (2014) des changements attendus de l'habitat actuel d'ici la fin du siècle en cours pour 24 essences de la zone tempérée nordique, sous le scénario RCP 8.5, cohérence de ces changements attendus avec l'étude de Prasad *et al.* (2020), capacité à résister à la sécheresse (adapté de Boisvert-Marsh *et al.* 2020) et degré de vulnérabilité aux ravageurs exotiques présents ou susceptibles de s'introduire (adapté de l'annexe). L'information précédée d'une jauge dans le rouge souligne une perspective négative, celle précédée d'une jauge dans l'orangé souligne une perspective plutôt négative, celle précédée d'une jauge dans le jaune souligne une perspective neutre, celle précédée d'une jauge dans le vert jaunâtre souligne une perspective plutôt positive, et celle précédée d'une jauge dans le vert souligne une perspective positive.

| Essence | Évaluation des changements attendus de l'habitat actuel dans l'actuelle zone tempérée nordique selon Périé *et al.* (2014) | Cohérence avec Prasad *et al.* (2020) | Capacité à résister à la sécheresse | Vulnérabilité aux ravageurs exotiques |
|---|---|---|---|---|
| Bouleau jaune | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ; le reste est en partie susceptible de se maintenir et en partie susceptible de lui devenir défavorable. | Oui | Faible | Faible à modérée |
| Bouleau à papier | La grande majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir défavorable ; le reste est susceptible de lui devenir moins favorable. | Oui | Faible | Faible à modérée |
| Cerisier tardif * | L'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir. | Oui | – | Faible |
| Chêne rouge | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir ; le reste est susceptible de lui devenir plus favorable. | Oui | Forte | Modérée à forte |
| Épinette blanche | La grande majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir défavorable ; le reste est susceptible de lui devenir moins favorable. | – | Moyenne à forte | Faible à modérée |
| Épinette rouge | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ; une grande partie du reste est susceptible de lui devenir défavorable. | Non, plutôt un maintien de l'habitat | Faible à moyenne | Faible à modérée |
| Érable à sucre | La grande majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir ; certains habitats deviendront plus favorables et d'autres, moins favorables ou défavorables. | Oui | Moyenne | Modérée |
| Érable rouge | L'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir. | Oui | Moyenne | Faible à modérée |

* Voir la discussion pour d'autres facteurs de risques.

**Tableau 7.** (suite).

| Essence | Évaluation des changements attendus de l'habitat actuel dans l'actuelle zone tempérée nordique selon Périé *et al.* (2014) | Cohérence avec Prasad *et al.* (2020) | Capacité à résister à la sécheresse | Vulnérabilité aux ravageurs exotiques |
|---|---|---|---|---|
| Frêne d'Amérique | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir ; le reste est susceptible de lui devenir plus favorable. | Oui | Faible à moyenne | Forte |
| Frêne rouge | La grande majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir plus favorable. | – | – | Forte |
| Frêne noir | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ; le reste est susceptible de se maintenir, de lui devenir plus favorable ou de lui devenir défavorable. | – | Faible | Forte |
| Hêtre à grandes feuilles | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir ; le reste est susceptible de lui devenir plus favorable, de lui devenir défavorable ou moins favorable. | – | Moyenne | Forte |
| Noyer cendré | Près de la moitié de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir plus favorable, près du tiers est susceptible de se maintenir, puis le reste pourrait être moins favorable. | – | – | Forte |
| Noyer noir | Il n'y avait pas d'habitat notable au Québec. | Oui | – | Modérée à forte |
| Orme d'Amérique | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir plus favorable ; le reste est susceptible de se maintenir. | Oui | – | Forte |
| Ostryer de Virginie | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir ; le reste est susceptible de lui devenir plus favorable, moins favorable ou défavorable. | Oui | Moyenne à forte | Faible |
| Peuplier à grandes dents | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ou défavorable ; le reste est susceptible de se maintenir ou de devenir plus favorable. | Oui | Faible à moyenne | Faible à modérée |

**Tableau 7.** (suite).

| Essence | Évaluation des changements attendus de l'habitat actuel dans l'actuelle zone tempérée nordique selon Périé *et al.* (2014) | Cohérence avec Prasad *et al.* (2020) | Capacité à résister à la sécheresse | Vulnérabilité aux ravageurs exotiques |
|---|---|---|---|---|
| Peuplier faux-tremble | L'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ou défavorable. | Non, plutôt un maintien de l'habitat | Faible à moyenne | Faible à modérée |
| Pin blanc | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ou défavorable, puis le reste est susceptible de se maintenir ou de devenir plus favorable. | Non, plutôt un maintien de l'habitat | Moyenne à forte | Faible à modérée |
| Pin rouge | La majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir défavorable ou moins favorable ; le reste est susceptible de se maintenir ou de devenir plus favorable. | – | Forte | Faible à modérée |
| Pruche du Canada | La grande majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir défavorable ou moins favorable, mais certains habitats sont susceptibles de se maintenir et d'autres, de devenir plus favorables. | Oui | Faible à moyenne | Modérée à forte |
| Sapin baumier | L'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir défavorable. | Non, plutôt un maintien de l'habitat | Moyenne | Faible à modérée |
| Thuya occidental | La grande majorité de l'habitat de l'espèce est susceptible de lui devenir moins favorable ou défavorable, mais certains habitats sont susceptibles de se maintenir et d'autres de devenir plus favorables. | Oui | Moyenne | Faible |
| Tilleul d'Amérique | Environ un tiers de l'habitat de l'espèce est susceptible de se maintenir ; environ un tiers est susceptible de lui devenir moins favorable, et le reste est susceptible de lui devenir défavorable ou plus favorable. | – | Moyenne | Faible |

# Chapitre 3 — Discussion

Nous avons évalué les revenus tendance en dollars canadiens de 2018 que les arbres des principales essences forestières de la zone tempérée nordique au Québec peuvent générer lors de la première transformation du bois, ainsi que les taux annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre si les arbres étaient laissés sur pied plutôt que récoltés, dans un contexte de coupe partielle en forêt naturelle. Ces informations permettent de définir les DMF et d'identifier les arbres qui peuvent contribuer le plus à la production de valeur monétaire découlant de l'aménagement de ces forêts. En comparant ces revenus avec le coût moyen d'approvisionnement en coupe partielle en peuplements de feuillus (environ 70 $/m$^3$) provenant de l'enquête de 2019 (Groupe DDM 2021), on peut mieux apprécier le potentiel de rentabilité de la récolte de ces arbres.

Néanmoins, ces évaluations demeurent des indications de rentabilité à long terme dans un marché moyen ; elles ne captent pas les variations courantes de la demande et des prix. Si la tendance à long terme des prix est à la baisse, alors les rendements financiers et les DMF seront réduits en conséquence, un peu comme ce qui s'est passé au Wisconsin de 1967 à 1989 (Buongiorno et Hseu 1993) et comme le montre notre analyse de sensibilité. Notre analyse ne capte pas les facteurs pouvant faire varier le coût d'approvisionnement (la distance de transport ou le taux de prélèvement, par exemple) ni des particularités régionales d'absence de certains marchés, ce qui est fréquent pour des essences compagnes comme le pin blanc ou le thuya occidental.

Une particularité importante de notre étude, comparativement aux précédentes, est le calcul et la présentation d'intervalles de confiance à 95 % autour du DMF moyen. Le DMF moyen représente la meilleure valeur, mais les autres DHP présents dans l'intervalle de confiance constituent aussi de bonnes valeurs de DMF, puisqu'ils ne diffèrent pas significativement de la moyenne. Le choix final du DHP retenu pour récolter des arbres financièrement matures dans une coupe partielle se fait en intégrant d'autres critères décisionnels en plus du DMF. Les intervalles de confiance sont parfois étroits autour de la moyenne (soit ± 2 cm pour 15 des 43 DMF présentés aux tableaux 3 à 6), mais ils sont parfois très larges. Par exemple, pour l'érable à sucre de la classe CR-AB du groupe 4abcd, l'intervalle de confiance du $DMF_{11\ ans}$ s'étend de 36 à 52 cm. Un intervalle de confiance étroit résulte de la combinaison d'un bon nombre d'observations et de la présence d'une forte pente du taux annuel de changement de revenu brut près du seuil décisionnel de 0 %, qui fait en sorte que celui-ci diminue rapidement avec le DHP près de cette valeur. Des intervalles de confiance larges découlent surtout d'une pente très faible du taux annuel de changement de revenu brut autour de 0 %, puis parfois d'un plus petit nombre d'observations.

Une autre particularité de notre étude est l'analyse de sensibilité de l'accroissement en DHP, de l'évolution de la qualité et de l'évolution des prix des produits pour le bouleau jaune et l'érable à sucre de classe CR. La dégradation de la classe de qualité influence davantage le taux de changement de revenu qu'une variation de l'accroissement en DHP (±2 cm sur 11 ans, soit ±1,8 mm/an) ou que des fluctuations du prix des produits (±10 %). Sachant qu'à la fin du siècle dernier, l'accroissement moyen en DHP dans un réseau des érablières du Québec était d'environ 3 mm/an et que le gain d'accroissement résultant d'un effet de coupe partielle était de 0,4 à 0,9 mm/an (Majcen *et al.* 2005), il est difficile de concevoir une hypothèse plausible selon laquelle l'accroissement serait plus grand que l'étendue étudiée dans l'analyse de sensibilité. Même si les prix courants peuvent parfois varier de manière plus importante que la valeur de ±10 % fixée dans notre hypothèse, l'amplitude atteint rarement ±25 % en une année comparativement aux prix tendance, et de telles variations sont généralement de courte durée (Luppold et Bumgardner 2016).

Nos résultats confirment que l'objectif de maximiser les revenus de bois à court terme implique de laisser croître les arbres à de plus grands DHP lorsque les prix sont à la baisse, puis de réduire le diamètre de récolte lorsque les prix sont plus élevés que la tendance. Des propriétaires forestiers privés et indépendants d'une usine de transformation de bois peuvent facilement appliquer ce principe, à condition de pouvoir tolérer une grande variation interannuelle des récoltes et des revenus de bois. En revanche, ce principe est plus difficile à appliquer lorsque la forêt évaluée est liée de manière contractuelle à l'approvisionnement d'une usine de transformation. En effet, selon notre expérience, les gestionnaires de l'usine chercheront davantage à s'approvisionner à bas coût auprès de leurs

sources plus régulières d'approvisionnement dans les moments difficiles (creux de prix), ce qui exerce une pression à l'inverse de la logique financière démontrée dans notre étude. Ainsi, ils chercheraient davantage à récolter de plus beaux arbres de meilleure qualité lorsque les prix sont à la baisse. Ces exemples démontrent les limites de l'application stricte du taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre et des DMF dans la prise de décisions sylvicoles et d'aménagement forestier. D'autres facteurs entrent en considération.

Notre étude a aussi confirmé la liste des constats énumérés dans l'introduction au sujet du DMF et des taux de rendement. En particulier, nous rappelons que le taux de changement de revenu (une mesure de productivité) est meilleur pour des arbres de plus basse qualité (p. ex. : ceux de la classe C), puisqu'ils peuvent s'améliorer avec leur croissance. À l'opposé, nos résultats indiquent qu'il est plus risqué de laisser croître un gros arbre de belle qualité, car son accroissement en DHP est relativement modeste par rapport à ses risques de mortalité ou de dégradation.

## 3.1 Essences générant des revenus élevés

Quatre essences se sont distinguées des autres essences par la possibilité qu'elles ont d'offrir un revenu nettement supérieur au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$ : le chêne rouge, l'épinette blanche, l'épinette rouge et le pin blanc (figures 14 et 17). En effet, avec un DHP ≥ 34 cm environ, ces essences peuvent générer un revenu brut d'au moins 100 $/m$^3$. Cette situation découle de meilleurs prix offerts sur le marché pour les billes de ces essences (tableau 2), mais aussi de la grande proportion du VMB représentée par le volume net ou le volume de bois d'œuvre. À titre indicatif, le volume net des gros arbres à l'étude (DHP d'environ 50 cm) était d'environ 70 % du VMB pour le chêne rouge et de 95 % pour les épinettes et le pin blanc, tandis que cette proportion n'est que d'environ 50 % pour le bouleau jaune (figures 3, 13 et 16).

Nous n'avons pas analysé les revenus potentiels de 5 autres essences ayant une valeur potentiellement élevée, soit le frêne d'Amérique, le frêne rouge, le noyer cendré, le noyer noir et le pin rouge, faute de modèles de répartition par produits probants ou d'estimations suffisamment précises du revenu potentiel des produits pour ces essences. Les 4 premières, en plus d'être relativement rares dans la forêt publique québécoise, sont menacées par des ravageurs exotiques (voir le tableau A1 en annexe). Quant au pin rouge, malgré sa forte capacité à résister à la sécheresse, ses perspectives sont incertaines, puisque le modèle de Périé *et al.* (2014) prédit que la majorité de son habitat est susceptible de lui devenir défavorable ou moins favorable.

### *3.1.1 Chêne rouge*

Nous déduisons que la survie et la croissance du chêne rouge étaient très bonnes, car il a affiché parmi les meilleurs taux annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre, atteignant environ 6 % à un DHP de 24 cm (figure 15). De plus, son $DMF_{11\ ans}$ était parmi les plus grands, même si nous n'avons pu définir la valeur exacte par manque d'observations sur des arbres ayant un DHP > 54 cm (tableau 5). Malgré tout, le DMF de cette essence doit être interprété avec prudence, car le modèle de répartition par produits a été étalonné sur seulement 87 arbres provenant de 2 sites (données non publiées). Selon les résultats de leur étude quant à la probabilité qu'un chêne rouge soit non vigoureux dans les placettes temporaires de l'inventaire forestier en Outaouais de 2003 à 2011, Laliberté *et al.* (2016) ont proposé de récolter les chênes rouges vigoureux ayant un DHP plus grand que des valeurs variant de 34 à 46 cm. Le choix du DHP cible dans cet intervalle dépendrait du degré de dominance de l'arbre dans la placette ainsi que de la surface terrière occupée par le chêne rouge dans ladite placette. Nos résultats de $DMF_{11\ ans}$ sont plus près de ceux de Leak *et al.* (2017) dans le nord-est des États-Unis, lesquels ont évalué que la maturité financière serait atteinte au sommet du changement de classe de qualité de la bille de pied, soit à un DHP de 46 à 60 cm (18 à 24 pouces) selon la station et l'historique d'intervention, deux facteurs liés à la croissance de l'arbre. Par ailleurs, Trimble et Mendel (1969) avaient plutôt calculé des DMF de 56 à 72 cm (22 à 28 pouces) à un taux de rendement minimal de 2 % par année, selon la qualité de l'arbre et de la station.

Les plus grandes incertitudes au sujet du chêne rouge découlent de ses perspectives de croissance future. D'un côté, son habitat actuel dans la zone tempérée nordique est susceptible de se maintenir ou de devenir encore plus favorable avec les changements climatiques anticipés, ce qui en ferait une essence de choix sur plusieurs stations. D'un autre côté, cette essence est de modérément à fortement vulnérable aux ravageurs exotiques (tableau A1 en annexe). De plus, un champignon indigène découvert récemment au Québec, *Fomitiporia punctata* (P. Karsten) Murrill, commence à s'attaquer aux chênes rouges vivants, et non seulement à son bois mort (Boulet et Bussières 2018).

Considérant l'ensemble de ces risques qui pèsent sur le chêne rouge, il est possible que son taux annuel de changement de revenu brut diminue dans les prochaines décennies par rapport à celui observé dans la période à l'étude (2003 à 2019). Il suffirait d'une petite augmentation du taux de mortalité pour que le taux annuel de changement de revenu des chênes rouges ayant un DHP > 34 cm descende près du seuil de 0 %, puis amène une forte diminution du $DMF_{11\ ans}$ (figure 15).

### *3.1.2 Épinette blanche et épinette rouge*

Même si elles peuvent procurer un grand revenu potentiel (jusqu'à 110 $/m$^3$; figure 17), l'épinette blanche et l'épinette rouge présentent un risque non négligeable de perte de revenu moyen à partir d'un DHP de 36 cm, principalement à cause de leur risque relativement élevé de mortalité, particulièrement dans l'ouest de la province (Guillemette 2019). Le degré d'incertitude est faible au sujet du modèle de répartition par produits et la valeur monétaire des produits des épinettes, puisque ce sont des répartitions assez simples (tenant compte seulement du retrait d'une proportion de carie ; BMMB 2018) et que ces essences ont été abondamment étudiées à cet effet. La modélisation du changement de revenu a été réalisée sur l'évolution de 3 258 épinettes, dont 395 ayant un DHP de 32 à 38 cm, soit des valeurs près du seuil du $DMF_{11\ ans}$. Ainsi, l'incertitude sur ce seuil est quand même faible avec une telle intensité d'échantillonnage. Notons aussi que le taux annuel de changement de revenu était relativement bas (soit de 2 à 3 %) pour les épinettes ayant un DHP de 26 à 34 cm (figure 18).

Les changements climatiques anticipés modulent les perspectives et ajoutent de l'incertitude pour ces deux essences d'épinettes (tableau 7). En effet, la majeure partie de l'habitat actuel de l'épinette rouge dans la zone tempérée nordique est susceptible de lui être moins favorable vers 2080, alors que pour l'épinette blanche, c'est pratiquement tout son habitat dans cette zone qui est susceptible de lui devenir défavorable, même si tous les modèles ne convergent pas vers ces tendances. Pour l'épinette rouge, notre modèle de changement annuel de revenu étalonné avec des données de croissance observées de 2003 à 2019 est susceptible de demeurer applicable dans quelques décennies, même si le climat change d'une des manières anticipées. À l'opposé, pour l'épinette blanche, ce même modèle pourrait mener plus rapidement à une surestimation du rendement et du $DMF_{11\ ans}$ dans les prochaines décennies.

Nous avons évalué que l'épinette rouge et l'épinette blanche étaient faiblement à modérément vulnérables aux ravageurs exotiques (tableau 7). L'incertitude entoure principalement la vitesse à laquelle le longicorne brun de l'épinette s'approche de la zone de répartition des épinettes au Québec et l'ampleur réelle des dommages qu'il pourrait causer. L'arrivée de ravageurs exotiques pourrait mener à une surestimation du rendement des épinettes et de leur $DMF_{11\ ans}$ avec le modèle utilisé, mais cette situation pourrait ne survenir que dans quelques décennies. Il sera alors possible d'ajuster le diamètre de récolte des plus grosses épinettes lors d'une prochaine rotation (dans 20 à 40 ans).

### *3.1.3 Pin blanc*

Nous avons déduit que la survie et la croissance du pin blanc étaient très bonnes, car l'espèce a affiché parmi les meilleurs taux annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre, soit jusqu'aux environs de 6 % à un DHP de 24 cm (figure 18). De plus, son $DMF_{11\ ans}$ était parmi les plus grands, même qu'il n'a pu être défini avec précision par manque d'observations de croissance au-delà d'un DHP de 62 cm (tableau 6). Cependant, notre étude contient un niveau modéré d'incertitude quant au revenu potentiel de cette essence, car les 538 arbres à l'origine du modèle de répartition par produits provenaient uniquement de deux secteurs (BMMB 2018). De plus, la raréfaction des usines de transformation de pin blanc depuis deux décennies a fait en sorte qu'il est parfois plus difficile de mettre en marché son bois et, ainsi, d'obtenir les prix qui permettraient au revenu potentiel d'atteindre 145 $/m$^3$ (tableau 2 et figure 17). Néanmoins, une étude réalisée en Outaouais a démontré que la croissance en DHP du pin blanc augmentait avec son DHP, et ce, jusqu'à un DHP d'un peu plus de 60 cm (Godbout 2022). Dans une autre étude réalisée en Ontario, White (1953) a démontré que la croissance en volume du pin blanc culminait vers un âge de 190 ans, freinée par la progression de la carie. Toutefois, le taux moyen de carie était bien corrélé à l'âge des pins blancs, mais pas à leur DHP. Le trop faible nombre de très gros pins blancs dans notre jeu de données pourrait donc expliquer pourquoi nous n'avons pas observé de seuil de DMF pour cette espèce.

Le risque est modéré que les changements environnementaux anticipés au cours des prochaines décennies aient un effet majeur sur les taux de changement du revenu brut et le $DMF_{11\ ans}$ du pin blanc (tableau 7). D'abord, les informations utiles pour anticiper les conséquences de l'évolution anticipée du climat ne convergent pas toutes. L'essence a une capacité moyenne à forte de résister à la sécheresse, ce qui pourrait favoriser le maintien de son habitat ;

néanmoins, un peu plus de la moitié de son habitat actuel dans la zone tempérée nordique est susceptible de lui devenir défavorable ou moins favorable d'ici la fin du siècle. Ensuite, nous avons évalué que sa vulnérabilité face aux ravageurs exotiques était faible à modérée. Le principal enjeu avec le pin blanc est plutôt sa régénération difficile. En effet, la rouille vésiculeuse du pin blanc[k] (*Cronartium ribicola* Fisch), un champignon qui cause une nécrose dans les branches et le tronc, a été introduite au Québec en 1916 et menace principalement la régénération du pin blanc, plutôt que les arbres déjà bien établis.

## 3.2 Essences générant de faibles revenus

À l'opposé, 4 essences se sont distinguées par leur revenu potentiel nettement inférieur au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$ : le bouleau à papier, l'érable rouge, le tilleul d'Amérique et la pruche du Canada (figures 14 et 17). En effet, pour ces essences, les arbres ayant un DHP ≥ 30 cm environ ont affiché un revenu brut de 30 à 60 $/m$^3$. Cette situation découle principalement des prix plus bas offerts sur le marché pour les billes de ces essences (tableau 2), mais aussi, pour les essences feuillues, de la plus faible proportion du VMB représentée par le volume net dans l'arbre. À titre indicatif, le volume net exprimé des gros arbres à l'étude (DHP d'environ 50 cm) était d'environ 61 % pour le bouleau à papier, de 64 % pour l'érable rouge et de 44 % pour le tilleul d'Amérique (figure 13 et données non présentées).

### *3.2.1 Bouleau à papier*

Le taux maximal de changement annuel de revenu d'approvisionnement en bois d'œuvre du bouleau à papier n'a pas dépassé 0,3 % à un DHP de 24 cm, puis il est devenu négatif à un DHP de 30 cm (figure 15). La faible production de valeur monétaire du bouleau à papier dans ces conditions est cohérente avec le fort taux de mortalité précédemment rapporté pour les essences intolérantes à l'ombre dans les végétations potentielles à l'étude (Guillemette *et al.* 2017). Le bouleau à papier est une essence pionnière ayant un fort pic de croissance en DHP entre 10 et 30 ans ; si les conditions ne lui permettent pas de réaliser ce pic à cette étape de son développement, alors son potentiel d'atteindre de gros DHP serait plus limité (Godbout 2019). Le $DMF_{11\ ans}$ que nous avons observé à un DHP de 30 cm (tableau 5) est assez près de la valeur de 30 à 36 cm (12 à 14 pouces) recommandée par Leak *et al.* (2014) pour les États de la Nouvelle-Angleterre, laquelle reflète l'intention de laisser croître les arbres jusqu'à ce qu'ils atteignent un sommet de changement de classe de qualité de la bille de pied selon la station et l'historique d'intervention, deux facteurs liés à la croissance des arbres. Pour cette même région, Mendel (1969) avait plutôt calculé des DMF de 56 cm (22 pouces) à un taux de rendement minimal de 2 % par année. Notons, toutefois, qu'il ne considérait pas les risques que l'arbre se dégrade ou meure.

Le risque est élevé que les changements climatiques anticipés au cours des prochaines décennies aient des répercussions majeures sur les taux de changement du revenu brut et le $DMF_{11\ ans}$ du bouleau à papier (tableau 7). En effet, la grande majorité de son habitat actuel dans la zone tempérée nordique est susceptible de lui devenir défavorable, sinon moins favorable, d'ici la fin du siècle. L'essence est relativement sensible à la sécheresse, mais en revanche, elle présente une vulnérabilité faible à modérée aux ravageurs exotiques. D'ailleurs, nous n'en avons recensé aucun qui soit susceptible d'attaquer spécifiquement le bouleau à papier.

### *3.2.2 Érable rouge*

La performance de l'érable rouge, exprimée sur la base du taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre (environ 3 à 5 % à un DHP de 24 cm, figure 15) et du $DMF_{11\ ans}$ (34 cm ou 40 cm selon le territoire ; tableau 5) découle essentiellement de sa croissance en DHP et de sa survie, car il n'y avait pratiquement aucun gain de revenu financier à obtenir des billes d'une qualité supérieure à celle de la pâte (tableau 2). Le modèle de répartition par produits de cette essence a été étalonné avec seulement 80 arbres provenant principalement de deux sites (données non publiées). Malgré le niveau modéré d'incertitude que cela engendre, les faibles différences de prix entre les produits ont pour effet de minimiser les effets potentiels de cette source d'incertitude. Le $DMF_{11\ ans}$ que nous avons observé à un DHP de 40 cm dans le sud du Québec (tableau 5) est assez près de la valeur de 40 à 46 cm (16 à 18 pouces) recommandée par Leak *et al.* (2014) pour les États de la Nouvelle-Angleterre. Néanmoins, à un peu plus de 50 $/m$^3$, le revenu potentiel de l'érable rouge est faible (figure 14).

À l'ère préindustrielle, l'érable rouge était surtout concentré dans les forêts moins bien drainées, mais depuis, il a profité des coupes et de la diminution des feux de forêt pour prendre de l'expansion (Abrams 1998, Fei et Steiner 2009). Le risque est faible que les changements environnementaux anticipés au cours des prochaines décennies aient une

k https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/protection-milieu-forestier/protection-forets-insectes-maladies/maladies-fiches/rouille-vesiculeuse-pin-blanc/

incidence majeure sur les taux de changement du revenu brut et le $DMF_{11\ ans}$ de l'érable rouge. D'abord, les modèles de changement d'habitat prédisent le maintien de son habitat dans la zone tempérée nordique et il a une capacité moyenne de résister à la sécheresse (tableau 7). Ensuite, comme nous n'avons pas recensé de nouveaux ravageurs susceptibles de s'attaquer spécifiquement à l'érable rouge, nous avons évalué sa vulnérabilité comme faible à modérée.

#### *3.2.3 Tilleul d'Amérique*

Le tilleul d'Amérique ressemble à l'érable rouge par son taux maximal de rendement annuel (3,1 %) et son faible revenu (33 à 50 $/m$^3$, figures 14 et 15). Cependant, le fait que son $DMF_{11\ ans}$ était plus près de 50 cm laisse penser que sa croissance et sa survie sont meilleures (tableau 5). Le tilleul est une essence à croissance rapide offrant une grande proportion d'arbres de belle qualité (données non publiées), mais la densité basale de son bois (360 kg/m$^3$) s'apparente davantage à celle des peupliers (374 kg/m$^3$ pour le peuplier faux-tremble) qu'à celle des autres feuillus (559 kg/m$^3$ pour le bouleau jaune ; Duchesne et Letarte 2013). C'est ce qui lui confère, entre autres, un revenu faible par unité de volume pour le bois de pâte (33 $/m$^3$ ; tableau 2). Rappelons que l'incertitude est grande sur notre évaluation du volume net du tilleul, car nous ne disposions pas d'étude spécifique sur les produits de cette essence. Nous avons retenu l'hypothèse du Bureau de mise en marché des bois (BMMB 2018) selon laquelle le modèle du bouleau jaune s'appliquerait à cette essence.

Environ le tiers de l'habitat actuel du tilleul d'Amérique dans la zone tempérée nordique devrait lui demeurer favorable avec les changements climatiques anticipés d'ici la fin du siècle (tableau 7). C'est une essence ayant une résistance moyenne à la sécheresse et une faible vulnérabilité aux ravageurs exotiques. Le risque est donc faible que les changements environnementaux anticipés au cours des prochaines décennies aient un effet majeur sur les taux de changement du revenu brut et le $DMF_{11\ ans}$ du tilleul d'Amérique.

#### *3.2.4 Pruche du Canada*

Le taux annuel de changement du revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre de la pruche du Canada sur une période moyenne de 11 ans a atteint un sommet de 4,2 % à un DHP de 30 cm, puis il a décliné lentement jusqu'à devenir négatif à partir d'un DHP de 52 cm (figure 18). Cette performance relativement bonne, sur les plans du taux annuel de rendement et du $DMF_{11\ ans}$, provient essentiellement de la croissance en DHP et de la survie des arbres, car il n'y avait aucun gain de revenu financier à obtenir des arbres dont le DHP dépassait le seuil minimal de 30 cm pour produire des billes de sciages (tableau 2). Dans notre étude, une grande incertitude entoure les produits de cette essence, en raison du manque de documentation de la matrice de répartition par produits (MRN 1999). Malgré cela, la présence d'un seul produit (sciage) ayant un prix unique minimise les effets potentiels de cette source d'incertitudes. Le $DMF_{11\ ans}$ de 52 cm que nous avons observé dans le sud du Québec (tableau 6) se situe dans l'intervalle de DHP de 46 à 60 cm (18 à 24 pouces) recommandé par Leak *et al.* (2014) pour les États de la Nouvelle-Angleterre.

Il y a un risque élevé que les changements anticipés au cours des prochaines décennies diminuent le rendement de la pruche ainsi que son DMF. En effet, les changements climatiques anticipés devraient lui rendre la très grande partie de son habitat actuel dans la zone tempérée nordique défavorable ou moins favorable (tableau 7). De plus, ces changements pourraient favoriser la migration vers le Québec du puceron lanigère de la pruche, la principale menace exotique à la pruche.

### 3.3 Essences générant des revenus modérés

Nous avons trouvé 7 essences dont le revenu potentiel moyen est généralement comparable au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$ : le bouleau jaune, le cerisier tardif, l'érable à sucre, le peuplier faux-tremble, le peuplier à grandes dents, le sapin baumier et le thuya occidental (figures 4, 9, 14 et 17). Notons toutefois qu'il a été porté à notre attention que le revenu des peupliers, estimé à 75 $/m$^3$, pouvait être nettement surestimé et qu'un revenu de 55 $/m$^3$ aurait pu être plus réaliste (Pascal Gauthier, ing.f., MBA, communication personnelle, avril 2021). Ainsi, les peupliers auraient pu être regroupés avec les essences à revenu faible. Nous avons réalisé une seconde analyse des DMF des peupliers avec cette seconde hypothèse de revenu, mais celle-ci n'a pas modifié les $DMF_{11\ ans}$.

Parmi ces 7 essences à revenu modéré, le bouleau jaune, le cerisier tardif et l'érable à sucre se démarquent par la plus faible proportion du VMB représentée par le volume marchand net dans un arbre. À titre indicatif, le volume net exprimé en proportion du VMB des arbres ayant un DHP d'environ 40 cm était de 55 % pour le bouleau jaune (figure 3), de 52 % pour le cerisier tardif (figure 8) et de 62 % pour l'érable à sucre (données non présentées). Ainsi, pour ces 3 essences, près de la moitié du

VMB à un tel DHP n'était pas mesuré pour la vente aux usines, que ce soit à cause de la carie, de grosses branches abandonnées en forêt ou arrachées naturellement avant l'abattage, ou de déformations rendant difficile leur transport à l'usine. À un DHP de 40 cm, la proportion du VMB récupérée dans le volume net était bien plus grande pour le peuplier faux-tremble et le peuplier à grandes dents (88 % ; données non présentées) ainsi que le thuya occidental (91 % ; figure 16). La situation était comparable pour le sapin baumier à un DHP de 24 cm (94 % ; figure 16).

Ainsi, même si le bouleau jaune, le cerisier tardif et l'érable à sucre de grand DHP peuvent contenir des billes ayant une grande valeur unitaire (p. ex. : 105 à 186 $/m$^3$ pour des billes de sciage de qualité F1 et F2 ; tableau 2), leurs volumes nets par arbre, pour un même DHP, sont nettement moindres que ceux des peupliers et des résineux. Cela diminue le revenu potentiel par arbre ainsi que le revenu potentiel par unité de surface associé à ces peuplements. Cette situation est aussi accentuée par la grande proportion de bois de pâte dans ces arbres (environ 52 % du volume net à un DHP de 40 cm ; données non présentées), catégorie offrant un revenu nettement moindre (53 à 55 $/m$^3$ ; tableau 2).

### *3.3.1 Bouleau jaune*

Le taux maximal de changement annuel de revenu du bouleau jaune varie beaucoup selon le groupe de régions écologiques et la combinaison des classes MSCR et ABCD (15 combinaisons ; figures 6 et 7, tableau 3). Les valeurs atteignent 4,5 à 6,4 % pour les bouleaux jaunes de qualité C de la classe CR à un DHP de 34 à 42 cm. Dans l'intervalle étudié, ces arbres n'atteignent pas de taux négatifs à un DHP supérieur à 26 cm. Les quelques taux négatifs observés à des DHP de 24 ou 26 cm sont possiblement attribuables à la courte période de croissance entre les mesures. Conséquemment, une période d'observation qui aurait permis de quantifier leur croissance au-delà d'un DHP de 34 cm aurait probablement donné des résultats différents. L'absence de taux négatifs à des DHP supérieurs à 26 cm nous fait penser que ces bouleaux jaunes pourraient produire plus de revenu de bois d'œuvre, s'ils gagnaient une classe de qualité de la bille de pied ou s'ils généraient une bille dans la portion supérieure de l'arbre. William Leak (Leak 1969, Leak *et al.* 2014, 2017) propose d'ailleurs d'évaluer le DMF au moment où l'arbre atteint son maximum de gain potentiel de classe de qualité. Cette proposition corrobore nos résultats d'analyse de sensibilité sur l'évolution de la classe de qualité. Ainsi, pour les bouleaux jaunes sains et de qualité modérée (classe C), il y aurait un gain financier à les laisser croître tant qu'ils sont sains (classe C ou R) ou jusqu'à ce qu'ils atteignent la qualité A ou B, cas dans lequel il faut se référer au modèle des CR-AB.

Notons que le revenu brut d'approvisionnement du bouleau jaune de qualité C est généralement inférieur au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$. Seuls les bouleaux jaunes ayant un DHP d'environ 42 cm et plus qui sont situés dans les régions écologiques 3c, 3d ou 4c atteignent ce seuil (figure 4). Dans ces régions écologiques, il y a donc un avantage financier à les laisser croître jusqu'à de grands DHP ou jusqu'à l'atteinte d'une meilleure classe de qualité.

Les taux de changement de revenus observés pour les bouleaux jaunes de la classe CR-AB atteignent un maximum de 1,6 à 2,9 % à un DHP de 34 à 38 cm, puis ils déclinent progressivement. Bien que le seuil de DHP moyen de transition vers un taux négatif (c'est-à-dire le $DMF_{11\ ans}$) puisse être relativement grand pour les bouleaux jaunes CR-AB (de 42 à 56 cm selon le groupe), notons que l'intervalle de confiance à 95 % contient des taux négatifs à partir d'un DHP de 34 à 46 cm (figure 6 et tableau 3). Pour le groupe de régions écologiques « autres », les valeurs négatives de la borne inférieure de l'intervalle de confiance peuvent être attribuables au faible échantillonnage (n = 82). En revanche, pour les groupes 2a3abc et 4abcd, les taux négatifs sont principalement attribuables au fait que les taux moyens de changement de revenu sont près de 0 % dans les classes de DHP qui précèdent le DMF moyen. Rappelons que ces bouleaux jaunes sont ceux ayant le meilleur revenu brut d'approvisionnement, et que ces valeurs sont rarement inférieures au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$ (figure 4).

Quand toutes les classes de qualité (groupe ABCD) sont regroupées, les taux de changement pour les bouleaux jaunes de la classe CR atteignent un maximum de 3,4 % à 4,1 % à un DHP de 24 à 32 cm, puis déclinent et atteignent leur $DMF_{11\ ans}$ à des DHP de 48 à 56 cm. Ces DMF sont semblables ou légèrement supérieurs à ceux calculés sur 20 ans par Guillemette (2016), soit de 45 à 47 cm selon la région au Québec. Les différences entre ces deux études sont principalement attribuables à la méthode de modélisation, dans les données de croissance, ainsi que les modèles de répartition par produits. Pour les États de la Nouvelle-Angleterre, Leak *et al.* (2014) estiment le DMF du bouleau jaune à un DHP de 46 à 60 cm (18 à 24 pouces) selon la station et l'historique

d'intervention. Le développement de la carie dans le tronc des bouleaux jaunes au Québec explique en partie l'obtention d'un DMF inférieur à ceux proposés en Nouvelle-Angleterre. En effet, Moreau *et al.* (2023) ont observé, avec les données des réseaux DRF-CJ et MER-CJ du Québec, qu'environ 25 % des bouleaux jaunes sains et vigoureux ayant un DHP de 40 cm développent de la carie sur un horizon de 30 ans.

Un résultat qui peut paraître surprenant est que les $DMF_{11\ ans}$ du bouleau jaune des classes CR et des classes de qualité AB ou ABCD sont nettement supérieurs dans le groupe de régions écologiques 4abcd (56 cm) que dans les 2 autres groupes de régions écologiques situées plus au sud (42 à 52 cm ; tableau 3). Si l'on se réfère à la classification écologique, le bouleau jaune est une essence représentative des stations mésiques des domaines bioclimatiques de l'érablière à bouleau jaune (régions écologiques 3a à 3d) et de la sapinière à bouleau jaune (régions écologiques 4a à 4g ; Saucier *et al.* 2009). De ce point de vue, il est logique que le bouleau jaune performe à son meilleur dans le groupe 4abcd. D'ailleurs, Périé *et al.* (2012) ont démontré que l'accroissement potentiel du bouleau jaune au Québec est meilleur aux endroits où la température est plus fraîche et où les précipitations sont plus abondantes. Or, la température moyenne du groupe 4abcd est inférieur d'environ 1 °C à celle des deux autres groupes. De plus, les précipitations annuelles y sont plus abondantes d'environ 100 mm par rapport au groupe 2a3abc, mais semblables à celles du groupe « autres » (données non présentées). Par ailleurs, dans les données étudiées, le taux de mortalité du bouleau jaune CR-AB dans le groupe 4abcd (4,6 %) est nettement inférieur à celui des 2 autres groupes de régions écologiques (6,9 à 9,8 %, données non publiées). Guillemette *et al.* (2017) ont déjà démontré que le bouleau jaune avait un plus faible taux de mortalité dans les endroits plus frais. La poursuite des mesures périodiques dans les réseaux de placettes à l'étude permettra de capter une plus grande variabilité temporelle des conditions de croissance et peut-être rapprocher les taux de mortalité pour les 3 groupes étudiés. Rappelons que le DMF moyen indique le meilleur DHP disponible en ce moment, mais que les intervalles de confiance à 95 % autour de cette moyenne correspondent aussi à de bonnes valeurs de DMF. Ces informations peuvent être utilisées avec d'autres données afin de faire des choix judicieux d'aménagement.

Le risque est modéré que les changements environnementaux anticipés au cours des prochaines décennies aient un effet majeur sur les taux de changement du revenu brut et le $DMF_{11\ ans}$ du bouleau jaune (tableau 7). D'abord, près de la moitié de son habitat actuel dans la zone tempérée nordique est susceptible de lui devenir moins favorable d'ici la fin du siècle à cause des changements climatiques anticipés. De plus, quelques pertes d'habitat pourraient avoir lieu dans le sud-ouest de la province. Le bouleau jaune a une faible capacité à résister à la sécheresse, mais il a sa place dans les microsites bien alimentés en eau. Sa vulnérabilité aux ravageurs exotiques est évaluée de faible à modérée.

### *3.3.2 Cerisier tardif*

Le cerisier tardif est une essence relativement marginale au Québec, où il se trouve à la limite nordique de son aire de répartition (Marquis 1990). D'ailleurs, c'est de loin l'essence la moins représentée dans le jeu de données de croissance, avec seulement 158 arbres, comparativement à 773 pour le tilleul d'Amérique, la seconde essence la moins représentée. Cette situation explique l'absence de données provinciales sur sa répartition par produits et l'absence d'étude sur son revenu potentiel, qui a entraîné l'utilisation des données du chêne rouge à cette fin.

Nous avons observé un bon taux annuel de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre pour le cerisier tardif à des DHP d'environ 26 cm, avec un sommet à 4,2 %. Nous avons manqué d'observations à de plus gros DHP (figure 15), avec seulement 11 individus ayant un DHP ≥ 34 cm, la plupart (64 %) desquels étaient de faible qualité (classe C ou D ; données non présentées). Au cours de la période de croissance à l'étude, les 3 individus de la classe M ou S sont morts, et 2 des 8 autres arbres de la classe C ou R sont passés à la classe M. Ces observations soutiennent l'idée que le potentiel du cerisier tardif au Québec est relativement faible pour générer des bois des dimensions recherchées par l'industrie du bois d'œuvre (DHP > 33 cm). C'est pourquoi nous avons regroupé le cerisier tardif avec les essences à revenu modéré (72 $/m$^3$ à un DHP de 26 cm) plutôt qu'avec le chêne rouge, dont le revenu peut dépasser 100 $/m$^3$ à un DHP de 34 cm et plus (figure 14).

Les changements climatiques anticipés d'ici la fin du siècle sont susceptibles de maintenir l'habitat du cerisier tardif au Québec (tableau 7), ce qui pourrait maintenir son taux de changement de revenu. L'essence est faiblement vulnérable aux ravageurs exotiques, mais comme toutes les espèces du genre *Prunus*, le cerisier tardif est affecté par le nodule noir du cerisier (*Dibotryon morbosum* (Schweinitz) Theissen & Sydow), un champignon qui cause des renflements noirs, durs et allongés sur les branches

ou le tronc et qui peut tuer ces parties de l'arbre[l]. Le nodule noir est très présent sur le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L. f.), lequel est beaucoup plus commun dans les forêts du Québec que dans celles des États-Unis (Périé *et al.* 2014). En plus de la nordicité et d'un historique différent d'exploitation forestière (plus de coupes totales aux États-Unis), la forte abondance du nodule noir du cerisier au Québec pourrait aussi expliquer les difficultés du cerisier tardif à atteindre de gros DHP, comparativement au plateau des Allegheny des États de Pennsylvanie et de New York, où cette essence abonde (Marquis 1990, Prasad *et al.* 2020). Néanmoins, des signes de déclins du cerisier tardif dans ce plateau commencent à être observés. Ce déclin pourrait être attribuable à une réduction des dépôts atmosphériques riches en azote au cours du XXe siècle ainsi qu'à un changement dans les relations entre la végétation et les microorganismes du sol (Royo *et al.* 2021). Les conditions qui pourraient favoriser l'intensification de la production de cerisier tardif au Québec semblent complexes et méconnues.

### *3.3.3 Érable à sucre*

La grande quantité de données de croissance et la régionalisation du modèle de répartition par produits de l'érable à sucre ont permis de calculer 15 combinaisons de DMF, selon le groupe de régions écologiques et la combinaison des classes MSCR et ABCD (figures 11 et 12, tableau 4).

Vu la rareté de valeurs négatives du taux de changement annuel de revenu de l'érable à sucre de qualité C de la classe CR dans l'étendue des DHP présentés, on peut penser que ces arbres pourraient augmenter en revenu potentiel de bois d'œuvre s'ils étaient capables de gagner une classe de qualité pour la bille de pied ou de générer une bille supplémentaire de sciage dans une portion supérieure de l'arbre. Ainsi, pour la plupart des cas étudiés, il y aurait un gain financier à laisser croître les érables à sucre sains (classe C ou R) et de qualité modérée (classe C) tant qu'ils sont sains ou jusqu'à ce qu'ils atteignent la qualité A ou B. Dans un tel cas, il faudrait se référer au modèle des classes CR-AB. Dans les régions écologiques d'un des domaines bioclimatiques de l'érablière (2a, 3a ou 3b sur la figure 9), le revenu brut d'approvisionnement de l'érable à sucre de qualité C atteint le coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$, à partir d'un DHP de 42 à 48 cm. Dans les régions écologiques du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune, ce revenu plafonne entre 60 et 69 $/m$^3$ pour les plus grands DHP étudiés.

Les taux de changement de revenus observés pour les érables à sucre de la classe CR-AB sont nettement plus faibles que pour ceux de la classe CR-C ; ils atteignent un maximum de 0,7 à 3,2 % à un DHP de 34 à 36 cm, puis ils déclinent progressivement. Bien que le seuil moyen de transition du DHP vers un taux négatif (c'est-à-dire le $DMF_{11\ ans}$) puisse être relativement grand pour les érables à sucre CR-AB (48 cm ou plus selon le groupe), l'intervalle de confiance à 95 % de ce seul pour le groupe 4abcd contient des taux négatifs à partir d'un DHP de 36 cm (figure 11 et tableau 4). Ces valeurs négatives de la borne inférieure de l'intervalle de confiance pour ce groupe sont principalement attribuables au fait que les taux moyens de changement de revenu sont près de 0 % dans les classes de DHP plus petits que le DMF moyen. Malgré tout, comme le modèle a été étalonné avec 237 évolutions d'arbres sur une période moyenne de 11 ans, il est peu probable que l'ajout d'échantillons rétrécisse considérablement l'intervalle de confiance autour du DMF moyen. Dans une autre étude réalisée dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune, au nord du fleuve Saint-Laurent, Guillemette et Havreljuk (2023) ont calculé un $DMF_{10\ ans}$ de 36 cm pour les érables à sucre de la classe CR-AB. La particularité de cette étude est que le revenu modélisé provient des planches extraites d'un échantillon d'érables à sucre qui ont été suivis de la forêt jusqu'à la sortie de l'usine de sciage, ce qui a permis d'évaluer le revenu en sciages de manière plus fine que dans la présente étude. En considérant ces 2 études, nous arrivons à la conclusion que dans le groupe de régions écologiques 4abcd, il n'y a pas de gain ni de perte de revenu à laisser croître pendant environ 10 ans les érables à sucre de la classe CR-AB ayant un DHP de 36 à 46 cm.

Nous rappelons que le DMF moyen correspond à la meilleure valeur disponible en ce moment, mais que les intervalles de confiance à 95 % autour de cette moyenne présentent d'autres valeurs possibles de DMF. Ces informations peuvent être utilisées avec d'autres données afin de faire des choix judicieux d'aménagement. Par exemple, bien que nos résultats de croissance indiquent un léger gain de revenu à laisser croître des érables à sucre de la classe CR-AB ayant un DHP de 38 à 46 cm dans le groupe 4abcd (figure 11), le revenu de ces érables à sucre plafonne à 65 $/m$^3$ dans la région écologique 4b, ce qui représente un revenu inférieur au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle, estimé à 70 $/m$^3$ (figure 9).

l https://agriculture.canada.ca/fr/agriculture-environnement/lutte-antiparasitaire-agriculture/maladies-ravageurs/nodule-noir-du-prunier-du-cerisier

En regroupant toutes les classes de qualité, les taux de changement de revenu atteignent un maximum d'environ 3 % pour les érables à sucre de la classe CR et ayant un DHP de 24 à 32 cm dans les groupes 2a3abc et 4abcd. Ils déclinent ensuite et atteignent le $DMF_{11\ ans}$ à des DHP de 54 et 46 cm, respectivement. Dans le groupe de régions écologiques « autres », les taux de changement de revenu atteignent un maximum de 3,5 à 5,6 % à des DHP de 24 à 38 cm ; ils déclinent ensuite lentement, sans toutefois atteindre des valeurs négatives dans l'intervalle de DHP étudié (jusqu'à 56 cm ; figure 11). Seul le $DMF_{11\ ans}$ du groupe 4abcd (46 cm) est semblable à ceux calculés sur 20 ans par Guillemette (2016) (de 43 à 45 cm selon la région écologique au Québec). Pour les deux autres groupes de régions écologiques, les DMF de la présente étude sont nettement plus grands. Les différences entre cette étude-ci et celle de Guillemette (2016) sont principalement attribuables à la méthode de modélisation des données de croissance ainsi qu'aux modèles de répartition par produits. Plusieurs études réalisées aux États-Unis sur le taux de rendement financier de l'érable à sucre ont produit des résultats pouvant s'appliquer à la partie du Québec au sud du fleuve Saint-Laurent (p. ex. : Dey *et al.* 2017, Hansen et Nyland 1987, Mendel *et al.* 1973, Webster *et al.* 2009). Ces rapports proposent des DMF qui varient de 40 cm à plus de 60 cm selon les méthodes utilisées, mais surtout selon le taux de rendement financier recherché (généralement 2 %, 4 % ou 6 %) et le contexte du marché du bois (marché en croissance ou non, possibilité de vendre des billes de déroulage, etc.). Nos résultats pour les arbres de la classe CR dans le groupe de régions écologiques « autres » sont cohérents avec les études américaines. En effet, Moreau *et al.* (2023) ont observé, avec les données des réseaux DRF-CJ et MER-CJ du Québec, qu'environ 30 % des érables à sucre sains et vigoureux ayant un DHP de 40 cm développent de la carie sur un horizon de 30 ans.

Le risque est faible que les changements environnementaux anticipés au cours des prochaines décennies aient une incidence majeure sur les taux de changement du revenu brut et le $DMF_{11\ ans}$ de l'érable à sucre (tableau 7). D'abord, la grande majorité de son habitat actuel dans la zone tempérée nordique est susceptible de lui demeurer favorable d'ici la fin du siècle, malgré les changements climatiques anticipés. Ensuite, nous avons évalué que sa vulnérabilité aux ravageurs exotiques était modérée. Jusqu'à présent, les principales menaces auxquelles fait face l'érable à sucre (la coloration filiforme de l'aubier, le longicorne des agrumes et le longicorne étoilé) peuvent être contrôlées (tableau A1 en annexe).

### *3.3.4 Peuplier faux-tremble et peuplier à grandes dents*

Bien que les peupliers soient des essences à croissance rapide, nous déduisons que leurs taux de survie sont relativement bas, puisque le peuplier faux-tremble et le peuplier à grandes dents ont affiché des taux annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre d'au plus 0,8 et 1,6 %, respectivement, à des DHP de 20 cm et plus (figure 15). Ces taux diminuaient progressivement pour de plus grands DHP, de sorte que nous établissons le $DMF_{11\ ans}$ à 30 cm pour le peuplier faux-tremble et à 38 cm pour le peuplier à grandes dents (tableau 5). Le prix des produits n'encourage pas l'atteinte de grands DHP (tableau 2). Nous n'avons pas considéré le peuplier baumier (*Populus balsamifera* L.) et le peuplier deltoïde (*Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall), car ces deux essences sont rares dans les types de peuplements à l'étude.

Les changements climatiques anticipés sont susceptibles d'avoir des effets négatifs sur l'habitat du peuplier faux-tremble dans la zone tempérée nordique d'ici la fin du siècle, mais les études consultées ne convergent pas parfaitement (tableau 7). Vu la capacité faible à moyenne du peuplier faux-tremble à résister à la sécheresse, les changements climatiques pourraient diminuer son taux de revenu là où l'espèce est déjà présente. Pour le peuplier à grandes dents, les répercussions attendues sont moindres, avec certains habitats maintenus et d'autres devenant moins favorables ou défavorables, mais c'est aussi une essence ayant une capacité faible à moyenne à résister à la sécheresse. Néanmoins, ces deux essences ont une vulnérabilité faible à modérée face aux ravageurs exotiques. Avec les faibles taux de rendement observés pour ces essences, une légère diminution de leur survie pourrait engendrer une baisse de leur $DMF_{11\ ans}$ de plusieurs classes de DHP (figure 15).

### *3.3.5 Sapin baumier*

Pour le sapin baumier, le taux annuel de changement du revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre sur une période moyenne de 11 ans atteint un sommet de 32 % à un DHP de 10 cm, puis il décline rapidement à moins de 0 % à un DHP de 24 cm, ce qui correspond à son $DMF_{11\ ans}$ (tableau 6 et figure 18). Nous avons effectué des analyses selon les mêmes 3 subdivisions territoriales retenues pour

le bouleau jaune et l'érable à sucre, mais les résultats étaient les mêmes que pour l'ensemble de la province (résultats non présentés).

L'aspect le plus important concernant nos résultats est que la croissance du sapin baumier a été observée dans une période épargnée par le cycle des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE, *Choristoneura fumiferana* Clemens), un insecte qui se nourrit principalement des aiguilles du sapin baumier et qui lui cause une forte mortalité[m]. Ces épidémies ont un cycle d'environ 30 ans. Il ne fait aucun doute que si les dommages causés par la TBE avaient été captés au cours de la période de croissance à l'étude, alors le $DMF_{11\ ans}$ du sapin baumier aurait été fort probablement beaucoup plus faible que 24 cm. Sachant aussi que pour le sapin, la proportion du VMB correspondant au volume net augmente de 67 à 92 % quand le DHP passe de 10 à 16 cm, puis que le revenu brut augmente de 50 à 66 $/m$^3$ dans ce même intervalle de DHP (figures 16 et 17), alors il apparaît préférable d'utiliser, dans les coupes partielles, un DHP minimal de récolte plus près de 16 cm ou de 18 cm pour optimiser les revenus. Notons aussi que la capacité du sapin baumier à résister à la sécheresse est moyenne, et que son habitat actuel dans la zone tempérée nordique pourrait soit lui devenir défavorable (Périé *et al.* 2014), soit se maintenir (Prasad *et al.* 2020 ; tableau 7).

#### *3.3.6 Thuya occidental*

Les faibles taux de changement de revenu du thuya occidental (maximum de 3 % à un DHP de 18 cm, figure 18) et un $DMF_{11\ ans}$ de 38 cm (tableau 6) reflètent bien la croissance relativement lente de cette essence, comparativement à ses principaux concurrents, mais aussi son faible taux de mortalité (Boulfroy *et al.* 2012). Notre étude contient un niveau modéré d'incertitude quant au revenu potentiel associé par cette essence, car son modèle de répartition par produits (voir MRN 1999) est basé sur la production de bardeaux, soit le seul produit considéré dans l'analyse (BMMB 2018).

Les changements anticipés au cours des prochaines décennies sont susceptibles de modifier modérément les paramètres de croissance et de mortalité du thuya qui sont à la base des taux de changement de revenu et du $DMF_{11\ ans}$ calculés. En effet, dans la zone tempérée nordique, son habitat devrait devenir défavorable ou moins favorable, selon les endroits (tableau 7). En revanche, nous n'avons pas identifié de ravageurs exotiques introduits en Amérique du Nord qui représenteraient une réelle menace pour cette essence.

### 3.4 Diamètre à maturité financière à 30 ans

Notre calcul du $DMF_{11\ ans}$ découle du fait que l'évolution des arbres a été observée sur une période moyenne de 11 ans. La plupart des études américaines (p. ex : celles de Joseph Mendel) ont calculé des $DMF_{10\ ans}$. Seul Guillemette (2016) a déjà calculé des DMF sur 2 périodes d'évolution, soit sur 10 et 20 ans, à la suite de quoi il a observé une baisse du DMF d'environ 2 cm entre la période de 10 ans et celle de 20 ans. Nous avons utilisé ce modèle pour projeter les $DMF_{11\ ans}$ jusqu'à 30 ans, soit une période de rotation de plus en plus préconisée pour les coupes partielles dans les forêts à l'étude, en soustrayant simplement 4 cm au $DMF_{11\ ans}$ pour estimer le $DMF_{30\ ans}$ (tableaux 3 à 6). La faiblesse de cette méthode pourrait être comblée en développant des modèles de croissance qui incluent à la fois la qualité des feuillus (classification ABCD) et leur risque de mortalité (classification MSCR), puis en réalisant des simulations sur 30 ans ou plus. Cependant, pour la mise en œuvre dans les prescriptions sylvicoles, nous recommandons aux décideurs et aux décideuses d'utiliser aussi leur jugement, notamment en tenant compte des informations et des mises en garde fournies dans cette discussion.

m https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/protection-milieu-forestier/protection-forets-insectes-maladies/fiches-insectes/tordeuse-bourgeons-epinette/

# Conclusion et implications pour l'aménagement

Nous avons calculé les taux annuels de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre des arbres selon leur DHP et leurs DMF, afin de permettre aux aménagistes de mieux définir les arbres à récolter de manière à maximiser le gain de valeur selon les objectifs de production. Ces résultats permettront aussi de mieux définir les peuplements que l'on souhaite produire et que l'on peut espérer obtenir. Ces nouvelles connaissances aident à prioriser les tiges à récolter de manière à maximiser le gain de valeur du peuplement à la suite d'une coupe partielle. Toutefois, bien qu'elles s'intègrent à la démarche diagnostique conduisant à la prescription sylvicole, elles ne doivent pas devenir une modalité aveugle ciblant un diamètre maximal unique pour toutes les prescriptions sylvicoles.

Les taux annuels moyens de changement de revenu brut d'approvisionnement en bois d'œuvre publiés ici pour toutes les classes de DHP, de même que leurs intervalles de confiance, pourront éclairer la prise de décision d'un point de vue financier. Ces résultats démontrent aussi qu'il n'y a pas beaucoup de situations où le taux annuel de rendement atteint ou dépasse la valeur de 3,5 % recommandée pour les investissements publics (Boardman *et al.* 2010). Comme l'ont démontré plusieurs études américaines (voir l'introduction), les meilleurs taux de rendement sont observés pour des arbres ayant une forte croissance en DHP, qui avaient un faible revenu brut en début de période de croissance et qui ont de bonnes perspectives d'offrir dans l'avenir des produits ayant une plus grande valeur unitaire, comme une meilleure qualité de sciage ou une qualité de déroulage. D'un point de vue financier, il est plus rentable de chercher à stimuler la croissance des petits arbres ayant un bon potentiel de qualité, plutôt que de prolonger la croissance des gros arbres de belle qualité. Néanmoins, en choisissant entre laisser croître une tige ou la récolter, il faut aussi considérer le revenu potentiel des arbres après récolte. En effet, de nombreux arbres présentent un taux positif de changement de revenu, mais n'atteindront pas un revenu intéressant par rapport au coût moyen d'approvisionnement par coupe partielle.

De plus, la vulnérabilité des essences aux changements attendus au cours des prochaines décennies mérite d'être considérée afin de faire des choix éclairés. Des 24 essences évaluées dans la zone tempérée nordique, seul l'érable à sucre se démarque clairement par son potentiel d'offrir un revenu modéré accompagné de perspectives acceptables quant au maintien de son habitat et de sa résistance aux ravageurs exotiques. L'épinette blanche, l'épinette rouge, le pin blanc et le pin rouge suivent de près, mais les changements climatiques pourraient leur nuire. Le bouleau jaune et le chêne rouge suivent aussi l'érable à sucre de près, mais le premier est à risque de perte d'habitat en raison de sa faible capacité à résister aux sécheresses, tandis que le second est plus vulnérable aux ravageurs exotiques. Les autres essences ont soit un faible potentiel de revenu, soit de faibles perspectives de rendement financier, soit une plus grande vulnérabilité face aux risques associés aux changements globaux anticipés pour les prochaines décennies.

# Références bibliographiques


Abrams, M.D., 1998. *The Red Maple Paradox: What explains the widespread expansion of red maple in eastern forests?* BioScience 48(5): 355-364. https://doi.org/10.2307/1313374

Aukema, J.E., D.G. McCullough, B. Von Holle, A.M. Liebhold, K. Britton et S.J. Frankel, 2010. *Historical accumulation of nonindigenous forest pests in the continental United States.* BioScience 60(11): 886-897. https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.11.5

Bédard, S. et F. Brassard, 2002. *Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec en 1995 et 1996*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la planification et des communications. 15 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Rapport-effets-reels-mrn.pdf

Boardman, A.E., M.A. Moore et A.R. Vining, 2010. *The social discount rate for Canada based on future growth in consumption.* Can. Public Policy 36(3): 325-343. https://doi.org/10.3138/cpp.36.3.325

Boisvert-Marsh, L., S. Royer-Tardif, P. Nolet, F. Doyon et I. Aubin, 2020. *Using a trait-based approach to compare tree species sensitivity to climate change stressors in eastern Canada and inform adaptation practices.* Forests 11(9):989. https://doi.org/10.3390/f11090989

Boulfroy, E., E. Forget, P.V. Hofmeyer, L.S. Kenefic, C. Larouche, G. Lessard, J.-M. Lussier, F. Pinto, J.-C. Ruel et A. Weiskittel, 2012. *Silvicultural guide for northern white-cedar (eastern white cedar).* U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. Gen. Tech. Rep. NRS-98. Newtown Square, PA (États-Unis). 74 p. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-98

Boulet, B., 2005. *Défauts et indices de la carie des arbres : guide d'interprétation*. Les Publications du Québec, Sainte-Foy, Québec. 291 p. https ://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/guidemscr/index.php

Boulet, B. et G. Bussières, 2018. *Regard nouveau sur la biologie du polypore ponctué :* Fomitiporia punctata *(P. Karsten) Murrill.* Nat. Can. 142(3) : 59-72. https://doi.org/10.7202/1050999ar

[BMMB] Bureau de mise en marché des bois, 2018. *Guide d'analyse économique appliquée aux investissements sylvicoles.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau de mise en marché des bois. 63 p. https://bmmb.gouv.qc.ca/media/45568/guide_economique_2018.pdf

Buongiorno, J., et J.-S. Hseu, 1993. *Volume and value growth of hardwood trees in Wisconsin*. North. J. Appl. For. 10(2): 63-69. https://doi.org/10.1093/njaf/10.2.63

Couillard, P.-L, M. Bouchard, J. Laflamme et F. Hébert, 2022. *Zonage des régimes de feux du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 189. 23 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/MRF189.pdf

Dey, D.C., J. Dwyer et J. Wiedenbeck, 2017. *Relationship between tree value, diameter, and age in high-quality sugar maple (*Acer saccharum*) on the Menominee Reservation, Wisconsin*. J. For. 115(5): 397-405. https://doi.org/10.5849/jof.2016-026R1

[DPFMRNNE] Direction de la protection des forêts du ministère des Ressources naturelles de la Nouvelle-Écosse, 2014. *Analyse du risque phytosanitaire. Évaluation de la menace que pose le longicorne brun de l'épinette pour les forêts de la Nouvelle-Écosse*. Rapport parrainé par le groupe de travail sur les ravageurs forestiers du Conseil canadien des ministres des forêts. 92 p. https://www.ccmf.org/wp-content/uploads/2020/09/CCMF-Analyse-du-risque-du-longicorne-brun-de-l-epinette-2014.pdf

Duchesne, I. et M. Letarte, 2013. « Chapitre 5 — Les relations entre la sylviculture et les propriétés du bois ». Dans : Ministère des Ressources Naturelles (édit.), *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, Québec. p. 56-93.

Embree, D.G, 1991. *The winter moth* Operophtera brumata *in eastern Canada*, 1962-1988. For. Ecol. Manage. 39: 47-54. https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90161-N

Ewing, C.J., C.E. Hausman, J. Pogacnik, J. Slot et P. Bonello, 2019. *Beech leaf disease: An emerging forest epidemic.* For. Pathol. 49(2): e12488. https://doi.org/10.1111/efp.12488

Fei, S. et K.C. Steiner, 2009. *Rapid capture of growing space by red maple*. Can. J. For. Res. 39: 1444-1452. https://doi.org/10.1139/X09-065

Fortin, M., S. Bédard et J. DeBlois, 2009. *SaMARE : un modèle par tiges individuelles destiné à la prévision de la croissance des érablières de structure inéquienne du Québec méridional.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 155. 62 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire155.pdf

[GIEC] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2014. *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève (Suisse). 161 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

Giguère, M., 1998. *Guide du sciage des billons de feuillus durs*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. 22 p. https://diffusion.mern.gouv.qc.ca/Public/Biblio/Mono/2012/01/1101571.pdf

Godbout, C., 2019. *Mieux vaut éclaircir le bouleau à papier en bas âge!* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière nº 118. 2 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Avis118.pdf

Godbout, C., 2022. *Éclaircie commerciale de la pinède à pin blanc de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : Résultats 25 ans après la coupe*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 188. 58 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/MRF188.pdf

Grondin, J., D. Rioux, L. Innes, B. Boulet et J. Bérubé, 2013. « L'encre des chênes rouges ». Dans : Ministère des Ressources naturelles (édit.), *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1 — Les fondements biologiques de sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot. Les Publications du Québec, Québec, p. 678-681.

Groupe DDM, 2021. *Enquête sur les couts 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. https://bmmb.gouv.qc.ca/media/63631/19-1414_rf_enqu_te_des_couts_20210601_el.pdf

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 nº 145. 16 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note145.pdf

Guillemette, F., 2019. *Identifier les arbres les plus susceptibles de mourir après une coupe partielle dans l'érablière ou la bétulaie jaune*. For. Chron. 95(1) : 6-10. https://doi.org/10.5558/tfc2019-003

Guillemette, F. et H. Havreljuk, 2023. « At which diameter does sugar maple reach financial maturity at the northern edge of its range? » Dans: C. Kern et Y. Dickinson (édit). *Proceedings of the first biennial Northern Hardwood Conference 2021: Bridging science and management for the future*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, Madison, WI (États-Unis). Gen. Tech. Rep. NRF-P-211. p. 187-195. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-P-211

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 nº 168. 34 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire168.pdf

Guillemette, F. M.-M. Gauthier et R. Ouimet, 2017. *Partitioning risks of tree mortality by modes of death in managed and unmanaged northern hardwoods and mixedwoods*. For. Chron. 93(3): 246-258. https://doi.org/10.5558/tfc2017-033

Guillemette, F., M.-M. Gauthier et S. Bédard, 2018. *Effets réels de l'éclaircie sélective individuelle et d'une coupe de jardinage dans des peuplements de feuillus nordiques : résultats après 10 ans.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 181, 27 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Memoire181.pdf

Gyeltshen, J. et A. Hodges, 2005. *Citrus longhorned beetle,* Anoplophora chinensis (Forster) (Insecta: Coleoptera: Cerambycidae). University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences Extension. Electronic Data Information Source Publication EENY-357 (IN633). 4 p. https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/IN/IN633/IN633-4136294.pdf

Hanks, L.F., 1976. *Hardwood tree grades for factory lumber*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). Research Paper NE-333. 81 p. https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/research_papers/pdfs/scanned/rp333.pdf

Hartmann, H., Beaudet, M. et C. Messier, 2008. *Using longitudinal survival probabilities to test field vigour estimates in sugar maple (*Acer saccharum Marsh.). For. Ecol. Manage. 256(10): 1771-1779. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.045

Havreljuk, F., S. Bédard, F. Guillemette et J. DeBlois, 2015. « Predicting log grade volumes in northern hardwood stands of southern Quebec ». Dans: *ISCHP 2015: 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing.* 15 au 17 septembre 2015. Québec, QC. p. 107-114. https://mffp.gouv.qc.ca/our-publications/predicting-log-grade-volumes-in-northern-hardwood-stands-of-southern-quebec/?lang=en

Havreljuk, F., F. Guillemette, I. Auger et S. Bédard, soumis. *Modèles régionalisés de répartition des volumes par classes de qualité des billes pour l'érable à sucre et le bouleau jaune.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière.

Hansen, G. et R.D. Nyland, 1987. *Effects of diameter distribution on the growth of simulated uneven-aged sugar maple stands*. Can. J. For. Res. 17(1): 1-8. https://doi.org/10.1139/x87-001

Houston, D.R., 1993. *Recognizing and managing sapstreak disease of sugar maple*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Radnor, PA (États-Unis). Research Paper NE-675. 11 p. https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/research_papers/pdfs/scanned/OCR/ne_rp675.pdf

Jovanović, P., 1999. *Application of sensitivity analysis in investment project evaluation under uncertainty and risk*. Int. J. Proj. Manage. 17(4): 217-222. https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00035-0

Laliberté, J., D. Pothier et A. Achim, 2016. *Adjusting harvest rules for red oak in selection cuts of Canadian northern hardwood forests*. Forestry 89(4): 402-411. https://doi.org/10.1093/forestry/cpw012

Leak, W.B., 1969. « Financial maturity of yellow birch ». Dans: Doolittle, W.T. et P.E. Bruns (édit.), *Birch symposium proceedings.* 19 au 21 août 1969, Durham, NH (États-Unis). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). p. 145-146. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/48151

Leak, W.B., D.S. Solomon et P.S. DeBald, 1987. *Silvicultural guide for northern hardwood types in the northeast (revised).* U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Broomall, PA (États-Unis). Research Paper NE-603. 36 p. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/4421

Leak, W.B., M. Yamasaki et R. Holleran, 2014. *Silvicultural guide for northern hardwoods in the northeast.* U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). General Technical Report nº NRS-132. 46 p. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-132

Leak, W.B., M. Yamasaki, J. Ward, K. Desmarais et K.P. Bennett, 2017. *Ecology and management of northern red oak in New England.* University of New Hampshire Cooperative Extension, Durham, NH (États-Unis). 50 p. https://extension.unh.edu/sites/default/files/migrated_unmanaged_files/Resource006927_Rep9991.pdf

Lockard, C.R. et W.E. McQuilkin, 1959. « Managing merchantable stands for quality production ». Dans: *What's known about managing eastern white pine.* U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA (États-Unis). Station Paper nº 121. p. 56-60. https://www.nrs.fs.usda.gov/pubs/sp/sp_ne121.pdf

Luppold, W.G. et M.S. Bumgardner, 2016. *Domestic hardwood lumber consumption and exports, yesterday and today*. National Hardwood Magazine (Christmas 2016): 30-33. https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/jrnl/2016/nrs_2016_luppold_004.pdf

Majcen, Z., 1994. *Historique des coupes de jardinage dans les forêts inéquiennes au Québec*. Rev. For. Fr. 46(4) : 375-384. https://doi.org/10.4267/2042/26556

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 de recherche nº 96. 114 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire96.pdf

Majcen, Z., S. Bédard et S. Meunier, 2005. *Accroissement et mortalité quinze ans après la coupe de jardinage dans quatorze érablières du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 148. 39 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire148.pdf

Marquis, D.A., 1990. « Black Cherry ». Dans Burns, R.M. et B.H. Honkala (édit.), *Silvics of North America: Volume 2 — Hardwoods*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC (États-Unis). Agriculture Handbook nº 654. 877 p. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/prunus/serotina.htm

Mayfield, A.E., III, S.M. Salom, K. Sumpter, T. McAvoy, N.F. Schneeberger et R. Rhea, 2020. *Integrating chemical and biological control of the hemlock woolly adelgid: a resource manager's guide. FHAAST-2018-04*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Health Assessment and Applied Sciences Team, Morgantown, WV (États-Unis). FHAAST-2018-04. 34 p. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/misc_2020_mayfield_001.pdf

Mendel, J.J., 1969. « Financial maturity of paper birch ». Dans: Doolittle, W.T. et P.E. Bruns (édit.), *Birch symposium proceedings*. 19 au 21 août 1969, Durham, NH (États-Unis). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). p. 135-144. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/48151

Mendel, J.J., et G.R. Trimble, Jr., 1969. *The rate of value increase for yellow-poplar and beech*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. Upper Darby, PA (États-Unis). Research Paper NE-140. 27 p. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/7065

Mendel, J.T., T.J. Grisez et G.R. Trimble, Jr., 1973. *The rate of value increase for sugar maple.* U.S. Department of Agriculture, Forest service, Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA (États-Unis). Research paper NE-250. 19 p. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/23647

Messier, C., K. Puettmann, E. Filotas et D. Coates, 2016*. Dealing with non-linearity and uncertainty in forest management*. Curr. For. Rep. 2: 150-161. https://doi.org/10.1007/s40725-016-0036-x

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014a. *Classification des tiges d'essences feuillues : normes techniques*. 2e édition. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 98 p. https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2747223

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014b. *Réseaux des placettes-échantillons permanentes du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 10 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/Reseaux-PEP.pdf

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016. *Placettes-échantillons permanentes : normes techniques*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 238 p. https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2748265

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2017. *Plan d'aménagement forestier intégré tactique 2018-2023 applicable à l'unité d'aménagement 064-71 de la région des Laurentides*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion des forêts Lanaudière-Laurentides. 135 p.

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2021. *Insectes, maladies et feux dans les forêts du Québec en 2020*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la protection des forêts. 76 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/protection/RA_insectes_maladies_feux_2020_BR_MFFP.pdf

Moreau, G., M.J.L. Cecil-Cockwell, A. Achim, S. Bédard, F. Guillemette et J. Caspersen, 2023. *Quantifying the probability of decline in quality: Implications for selection management in northern hardwood forests.* Forests 14: 280. https://doi.org/10.3390/f14020280

[MRN] Ministère des Ressources naturelles, 1994. *Aménager pour mieux protéger les forêts : une stratégie*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. Publication FQ 94-3051. 97 p.

[MRN] Ministère des Ressources naturelles, 1999. *Manuel de mise en valeur des forêts privées du Québec.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des communications. 182 p. + 8 annexes.

[MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *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, Québec. 744 p.

[MRNFP] Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2002. *Plan d'action pour l'amélioration de l'aménagement des forêts feuillues du domaine de l'État*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs. 6 p.

Pannell, D.J., 1997. *Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies.* Agric. Econ. 16(2): 139-152. https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.1997.tb00449.x

Périé, C., L. Duchesne et M.-C. Lambert, 2012. *Prédire la croissance potentielle des arbres au Québec à l'aide des caractéristiques cartographiables des peuplements et des stations*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 164. 44 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire164.pdf

Périé, C., S. de Blois, M.-C. Lambert et N. Casajus, 2014. *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº 173. 46 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Mémoire173.pdf et https://mffp.gouv.qc.ca/changements-climatiques/outil/carte.html

Perron, J.-Y., 2003. *Tarif de cubage général. Volume marchand brut.* 3e publication. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 53 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/tarif-de-cubage-64.pdf

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. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-27.pdf

Prasad, A., J. Pedlar, M. Peters, D. McKenney, L. Iverson, S. Matthews et B. Adams, 2020. *Combining US and Canadian forest inventories to assess habitat suitability and migration potential of 25 tree species under climate change*. Divers. Distrib. 26: 1142-1159. https://doi.org/10.1111/ddi.13078

Reed, S.E., D. Volk, D.K.H. Martin, C.E. Hausman, T. Macy, T. Tomon et S. Cousins, 2022. *The distribution of beech leaf disease and the causal agents of beech bark disease (*Cryptoccocus fagisuga*,* Neonectria faginata*,* N. ditissima*) in forests surrounding Lake Erie and future implications.* For. Ecol. Manage. 503: 119753. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119753

Régnière, J., V. Nealis et K. Porter, 2009. *Climate suitability and management of the gypsy moth invasion into Canada.* Biol. Invasions. 11: 135-148. https://doi.org/10.1007/s10530-008-9325-z

Royo, A.A., L.A. Vickers, R.P. Long, T.E. Ristau, S.H. Stoleson et S.L. Stout, 2021. *The forest of unintended consequences: Anthropogenic actions trigger the rise and fall of black cherry.* BioScience 71: 683-696. https://doi.org/10.1093/biosci/biab002

Saucier, J.-P., A. Robitaille et P. Grondin, 2009. « Cadre bioclimatique du Québec ». Dans : « Section 2 - Écologie forestière ». Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (édit.), *Manuel de foresterie, 2e édition*. Éditions MultiMondes, Québec (Québec). p. 186-205.

Saucier, J.-P., F. Guillemette, P. Gauthier, J. Gravel, F. Labbé, S. Meunier, 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. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Rapport-Annexes-CIMOTFF.zip

SAS Institute Inc., 2021. *Base SAS® procedures guide : Statistical procedures*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis) https://documentation.sas.com/api/collections/pgmsascdc/v_016/docsets/procstat/content/procstat.pdf?locale=fr#nameddest=titlepage

Sweeney, J.D., C. Hughes, H. Zhang, N.K. Hillier, A. Morrison et R. Johns, 2020. *Impact of the invasive beech leaf-mining weevil,* Orchestes fagi*, on American beech in Nova Scotia, Canada.* Front. For. Glob. Change 3: 46. https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00046

Tran, J.K., T. Ylioja, R. Billings, J. Régnière et M.P. Ayres, 2007. *Impact of minimum winter temperatures on the population dynamics of* Dendroctonus frontalis. Ecol. Appl. 17(3): 882-899. https://doi.org/10.1890/06-0512

Trimble, G.R., Jr. et J.J. Mendel, 1969. *The rate of value increase for northern red oak, white oak, and chestnut oak*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA. (États-Unis). Res. Pap. NE-129. 29 p. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/7962

Trimble, G.R., Jr., J.J. Mendel et R.A. Kennell, 1974. *A procedure for selection marking in hardwoods: Combining silvicultural considerations with economic guidelines.* U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). 13 p. https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/research_papers/pdfs/scanned/OCR/ne_rp292.pdf

Walsh, B., 2022. *Spotted lanternfly and the potential impacts on the maple syrup industry.* Penn State Extension. Webinaire enregistré le 16 novembre 2022. https://extension.psu.edu/spotted-lanternfly-and-the-potential-impacts-on-the-maple-syrup-industry

Webster, C.E., D.D. Reed, B.D. Orr, J.M. Schmierer et J.B. Pickens, 2009. *Expected rates of value growth for individual sugar maple crop trees in the Great Lakes Region.* North. J. Appl. For. 26(4): 133-140. https://doi.org/10.1093/njaf/26.4.133

White, L.T., 1953. *Studies in forest pathology: X. Decay of white pine in the Timigami Lake and Ottawa Valley areas.* Can. J. Bot. 31(2): 175-200. https://doi.org/10.1139/b53-018

# Annexe

**Tableau A1.** Description sommaire des principaux ravageurs exotiques susceptibles de perturber la zone tempérée nordique au Québec. Les principales sources d'informations sont l'Agence canadienne d'inspection des aliments[n], le Invasive Species Center[o], et le U.S. Department of Agriculture Animal and Plant Health Inspection Service[p]. Le cas échéant, les sources d'informations complémentaires sont mentionnées. Les niveaux de risque vont de faible (F) à élevé (É), en passant par modéré (M).

| Noms français et latin du ravageur | Type d'organisme | Hôte(s) | Dommages causés | Risque | Statut de l'invasion et risque de prolifération | Sources complémentaires d'informations |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Agrile du frêne *Agrilus planipennis* Fairmaire | Insecte perceur du tronc | Frênes | Mortalité des arbres infestés en quelques années. | É | Découvert près de Détroit (Michigan) et de Windsor (Ontario) en 2002, il a connu une progression rapide et incontrôlée. Il est présent au Québec depuis 2008. Des guêpes exotiques ont été introduites comme agents de lutte biologique. | |
| Arpenteuse tardive *Operophtera brumata* Linnaeus | Insecte défoliateur | Principalement l'orme d'Amérique et les cerisiers | Affaiblissement des arbres. | F | Introduite en Nouvelle-Écosse dans les années 1930, puis en Colombie-Britannique vers 1972. Présente dans au moins 6 États américains. L'introduction de 2 parasitoïdes de l'insecte (*Cyzenis albicans* Fallén et *Agrypon flaveolatum* Gravenhorst) et peut-être d'autres facteurs biologiques non identifiés ont contenu les populations à des niveaux très faibles et tolérables en milieu forestier. | Embree (1991) |
| Chancre du noyer cendré *Ophiognomonia clavigignenti-juglandacearum* (N.B. Nair, Kostichka & J.E. Kuntz) Broders & Boland. | Champignon | Noyer cendré | Croissance d'un ou de plusieurs chancres sur l'arbre, ce qui l'affaiblit, cause un dépérissement et éventuellement la mort. | É | Découvert en 1967 au Wisconsin d'une origine inconnue, puis introduit au Québec 1990. Le noyer cendré est maintenant une espèce en voie de disparition selon la *Loi sur les espèces en péril* (L.C. 2002, ch. 29). | |
| Charançon du hêtre *Orchestes fagi* Linnaeus | Insecte défoliateur | Hêtres | Défoliation, puis mortalité en quelques années. | M | Découvert à Halifax en 2011, puis à l'Île-du-Prince-Edward en 2021. Des études sont en cours en Europe pour identifier des parasitoïdes qui pourraient contrôler les populations. | Sweeney *et al.* (2020). |

n https://inspection.canada.ca/protection-des-vegetaux/especes-envahissantes/fra/1299168913252/1299168989280
o https://www.invasivespeciescentre.ca/
p https://www.aphis.usda.gov/aphis/home/

**Tableau A1.** (suite).

| Noms français et latin du ravageur | Type d'organisme | Hôte(s) | Dommages causés | Risque | Statut de l'invasion et risque de prolifération | Sources complémentaires d'informations |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Coloration filiforme de l'aubier *Ceratocystis virescens* (R. W. Davidson) C. Moreau | Champignon de coloration de l'aubier | Érable à sucre | Dépérissement de l'arbre, puis mortalité après quelques années. Se propage par des blessures au pied et aux racines. | M | Découverte aux États-Unis vers 1935. Observée jusque dans l'État de New York. | Houston (1993) |
| Dendroctone méridional du pin *Dendroctonus frontalis* Zimmermann | Insecte perceur du tronc | Pin blanc, pin rouge et épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) H. Karst.) | Mortalité des arbres attaqués par plusieurs insectes, particulièrement les moins vigoureux. | F à M | Originaire du sud des États-Unis et de l'Amérique centrale. Au cours des dernières années, s'est déplacé vers le nord-est des États-Unis en profitant d'hivers plus cléments. Peu d'insectes survivent à une température minimale de –16 °C ou moins. | Tran *et al.* (2007) |
| Encre des chênes rouges *Phytophthora ramorum* Werres, De Cock & Man in't Veld. | Champignon | Maladie touchant plus de 120 espèces végétales, mais particulièrement mortelle pour les chênes rouges | Chez le chêne rouge, la maladie cause des chancres et un dépérissement éventuellement mortel. | F, sauf M pour le chêne rouge. | Découvert en début des années 1990 en Californie et en Europe. Le principal risque provient du déplacement de matériel à partir de pépinières de la côte ouest des États-Unis. La maladie peut être sournoise, car elle se déplace à l'aide d'espèces végétales présentant peu ou pas de symptômes. | Grondin *et al.* (2013) |
| Flétrissement du chêne *Bretziella fagacearum* Bretz | Champignon vasculaire qui se propage par greffe racinaire et par des insectes | Chênes | Les chênes rouges infestés meurent habituellement dans l'année suivant l'infection. | M à É | Découvert en 1942 aux États-Unis d'une origine inconnue. Observé en Ontario en 2023. La proximité de chênes infectés augmente beaucoup le risque de propagation par greffe racinaire. | |
| Fulgore tacheté *Lycorma delicatula* White | Insecte suceur de la sève des jeunes tiges et des feuilles | De nombreuses espèces de plantes | Affaiblissement des arbres et augmentation du risque de subir d'autres infections. Pour le moment, le noyer noir semble plus à risque d'en mourir. | F, sauf M à É pour le noyer noir. | Découvert en Pennsylvanie en 2014 et maintenant présent dans au moins 14 États américains, dont l'État de New York. | Walsh (2022) |
| Grand hylésine des pins *Tomicus piniperda* Linnaeus | Insecte perceur des jeunes pousses | Principalement les pins, mais aussi l'épinette de Norvège, le sapin baumier et le mélèze | Mortalité des arbres de faible vigueur, plus particulièrement chez le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). | F | Découvert en 1992 en Ohio, puis au Québec en 1998. | |

**Tableau A1.** (suite).

| Noms français et latin du ravageur | Type d'organisme | Hôte(s) | Dommages causés | Risque | Statut de l'invasion et risque de prolifération | Sources complémentaires d'informations |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Guêpe perce-bois, aussi nommée Sirex européen du pin. *Sirex noctilio* Fabricius | Insecte perceur du tronc | Principalement les pins, mais aussi les épinettes, le sapin et les mélèzes | Dommages au tronc et parfois mortalité des arbres, particulièrement s'ils sont stressés ou affaiblis. Les dommages ont été mineurs jusqu'à maintenant. | F à M | Découvert en 2004 dans l'État de New York, puis dans le sud du Québec en 2008. | |
| Longicorne brun de l'épinette *Tetropium fuscum* Fabricius | Insecte perceur du tronc | Épinettes | Mort des arbres infestées en 1 à 5 ans. Ceux de faible vigueur ou subissant un autre stress sont plus à risque d'être infestées. | F à M | Découvert à Halifax en 1999. Actuellement présent aussi au Nouveau-Brunswick. Progresse lentement. En 2014, il a été jugé que ce longicorne posait un risque faible à modéré pour les forêts de la Nouvelle-Écosse. | DPFMRNNE (2014) |
| Longicorne des agrumes *Anoplophora chinensis* Forster | Insecte perceur du tronc | Feuillus | Mort des arbres infestés. | F | Détecté à quelques endroits en Amérique du Nord, mais éradiqué à chaque fois. | Gyeltshen et Hodges (2005) |
| Longicorne étoilé (ou asiatique) *Anoplophora glabripennis* Motschulsky. | Insecte perceur du tronc | Bouleaux, érables, frênes, ormes, peupliers, saules, sorbier | Mort des arbres infestés en 10 à 15 ans. | F à M | Découvert à plusieurs endroits en Amérique du Nord depuis 1996. Tend à demeurer sur l'arbre d'où il a émergé, ce qui explique pourquoi les autorités parviennent jusqu'à présent à l'éradiquer en quelques années dans les territoires infestés. Par contre, 4 sites d'invasion sont difficiles à contrôler. | |
| Maladie corticale du hêtre, une interaction entre un insecte exotique, la cochenille du hêtre (*Cryptococcus fagisuga* Lindinger) et deux champignons : (*Neonectria faginata* [Lohman *et al.*] Castl. et Rossman, *Neonectria ditissima* [Tul. et C. Tul.] Samuels et Rossman)[q]. | Complexe insecte et champignons | Hêtre à grandes feuilles | Effets complexes et évolutifs selon le temps depuis la première invasion dans un peuplement forestier. Initialement, la maladie cause une forte mortalité, en particulier chez les plus gros arbres. | É | Introduite à Halifax en 1890, puis dans l'est du Québec en 1965 et en Ontario en 1999. La cochenille du hêtre est présente dans presque toute l'aire de répartition du hêtre au Québec, sauf dans quelques petites zones situées à la limite nord. | |

q Ministère des Ressources naturelles et des Forêts : https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/protection-milieu-forestier/protection-forets-insectes-maladies/maladies-fiches/maladie-corticale-hetre/

**Tableau A1.** (suite).

| Noms français et latin du ravageur | Type d'organisme | Hôte(s) | Dommages causés | Risque | Statut de l'invasion et risque de prolifération | Sources complémentaires d'informations |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Maladie des mille chancres *Geosmithia morbida* Kolařík, Freeland, Utley, Tisserat | Champignon transporté par un insecte : la chrysomèle du noyer (*Pityophthorus juglandis* Blackman) | Noyer noir | Les arbres infectés meurent habituellement dans les 3 années suivant l'infection. | M | Découverte dans l'ouest des États-Unis au cours des années 1990. Origine inconnue. Originaire de l'Arizona et du Nouveau-Mexique, puis découverte en Pennsylvanie en 2011 et en Ohio en 2012. Ne semble plus progresser vers le nord depuis ce temps.[r] | |
| Maladie du feuillage du hêtre : l'origine est encore incertaine, mais elle est associée à la présence du nématode *Litylenchus crenatae mccannii* (Handoo *et al.*) dans les feuilles et les bourgeons | Maladie d'origine encore incertaine | Hêtres | Encore mal connus. La maladie commence par causer un dépérissement des arbres. Après 7 années de suivi, la mortalité est surtout observée sur les semis et les gaules. | M à É | Découverte en Ohio en 2012. S'est déjà propagée dans 8 États américains et en Ontario. | Ewing *et al.* (2019), Reed *et al.* (2022) |
| Maladie du rond *Heterobasidion irregulare* Garbelotto, Otrosina.[s] | Champignon racinaire | Pins en particulier, mais parfois le sapin baumier, l'épinette blanche et le thuya | Mort des arbres en bordure de ceux récoltés, particulièrement dans les plantations de pins. | F, sauf F à M pour les pins | La maladie a possiblement migré depuis le Mexique au cours des derniers siècles, pour atteindre l'Ontario en 1955 et le sud du Québec en 1989. Il est très difficile d'éliminer le champignon une fois qu'il est installé sur un site. Certaines pratiques lors de la récolte permettent de prévenir sa propagation et ses impacts. | |
| Maladie hollandaise de l'orme *Ophiostoma ulmi* [Buisman] Nannf. et *Ophiostoma novo-ulmi* Brasier. | Champignons qui bloquent le transport d'eau dans l'arbre. Ils sont transportés par des scolytes (insectes) | Ormes | Mort des arbres, particulièrement ceux ayant un diamètre ≥ 20 cm. | É | Découvert au États-Unis dans les années 1930, puis au Québec en 1944. | |

r Site d'un effort collaboratif de 6 organismes américains : https://thousandcankers.com/
s Ministère des Ressources naturelles et des Forêts : https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/protection-milieu-forestier/protection-forets-insectes-maladies/maladies-fiches/maladie-rond/

**Tableau A1.** (suite).

| Noms français et latin du ravageur | Type d'organisme | Hôte(s) | Dommages causés | Risque | Statut de l'invasion et risque de prolifération | Sources complémentaires d'informations |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Puceron lanigère de la pruche *Adelges tsugae* Annand | Insecte suceur des aiguilles | Pruches | Mort des arbres infestés en moins de 4 à 15 ans. | M à É | Progresse lentement vers le nord depuis sa découverte en Virginie en 1951. Présent en Nouvelle-Écosse, dans le sud de l'Ontario et des États américains frontaliers du Québec. Les périodes de grands froids, particulièrement en mars, éliminent ou affaiblissent l'insecte. | Mayfield *et al.* (2020) |
| Rouille vésiculeuse du pin blanc *Cronartium ribicola* J. C. Fisch | Champignon qui cause une nécrose dans les branches et le tronc | Pin blanc | Forte mortalité chez les jeunes arbres (semis et gaules surtout), et affaiblissement des plus âgés. | F | Découverte vers 1900 en Amérique du Nord, puis introduite au Québec en 1916. | |
| Spongieuse asiatique 2 sous-espèces : *Lymantria dispar asiatica* Vnukovskij et *L. d. japonica* Motschulsky ou « complexe de la spongieuse volante », qui inclut aussi 3 autres espèces (*L. albescens* Matsumara, *L. postalba* Inoue et *L. umbrosa* Butler). | Insectes défoliateurs | Plus de 600 espèces de plantes | Les arbres sains survivent généralement à une défoliation, mais les arbres affaiblis peuvent en mourir. | F | Les premières invasions au Canada et aux États-Unis ont été éradiquées. Des actions d'éradication ont eu lieu en 2022 à la suite d'une détection en Colombie-Britannique en 2021. Ce complexe de spongieuses a la particularité de pouvoir voler et, donc de pouvoir se propager rapidement. | MFFP (2021), Régnière *et al.* (2009) |
| Spongieuse européenne *Lymantria dispar dispar* Linnaeus | Insecte défoliateur | Principalement les chênes, mais aussi de nombreux feuillus | Les arbres sains survivent généralement à 2 ou 3 années de défoliation, mais les arbres affaiblis peuvent en mourir. Susceptible de causer des dommages plus fréquents avec le réchauffement du climat. | F, sauf M pour les chênes | Présente dans le sud du Québec depuis 1959. Même si l'adulte a la forme d'un papillon, cette spongieuse ne vole pas et se déplace peu. | |
| Tenthrède en zigzag de l'orme *Aproceros leucopoda* Takeuchi | Insecte défoliateur | Ormes | Encore peu connus en Amérique du Nord. Possiblement un affaiblissement des arbres. | F à É | Découverte au Québec en 2020. | |

Le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) a comme mandat de s'assurer de la gestion durable des forêts publiques québécoises. Il accorde une grande importance à l'acquisition et au transfert des connaissances nécessaires à l'aménagement durable des forêts. Il souhaite entre autres accroître les connaissances permettant d'optimiser la réalisation des traitements sylvicoles.

Ce mémoire de recherche forestière présente les résultats, pour 15 essences du sud du Québec, d'une analyse de l'évolution sur 11 ans de la valeur financière des arbres pour le bois d'œuvre dans 3 réseaux de placettes permanentes. La maturité financière des arbres d'une essence est atteinte lorsque, pour un certain diamètre, le changement de valeur financière devient négatif à cause des pertes de bois par mortalité des arbres ou par leur dégradation sur pied.

De plus, la littérature scientifique a été recensée afin d'évaluer la vulnérabilité aux changements climatiques anticipés et les répercussions potentielles causées par l'arrivée de nouveaux ravageurs exotiques de ces 15 essences, de même que pour 9 autres de la zone tempérée nordique. Ces nouvelles menaces pourraient influencer les perspectives à long terme quant à l'utilisation des résultats financiers. Les aménagistes de la forêt ont donc en main des outils leur permettant à la fois de mieux définir les objectifs de production de bois des peuplements décidus ou mixtes et de prioriser les choix d'arbres à récolter lors d'une coupe partielle dans un peuplement de structure irrégulière ou jardinée.

***Ressources naturelles et Forêts***
Québec