

$$P'(t) = \frac{r}{k} P(t)(b - P(t))$$
$$V_{AE,ik} = \beta_1 d h p_{ik}^{\beta_2} H_{ik}^{\beta_3} + \varepsilon_{2,ik}$$



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Effets réels de l'éclaircie sélective individuelle et d'une coupe de jardinage dans des peuplements de feuillus nordiques : résultats après 10 ans

par François Guillemette, Martin-Michel Gauthier et Steve Bédard

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 181

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Effets réels de l'éclaircie sélective individuelle et d'une coupe de jardinage dans des peuplements de feuillus nordiques : résultats après 10 ans

par François Guillemette*, ing.f., M. Sc., Martin-Michel Gauthier, ing.f., M. Sc., *Ph. D.* et Steve Bédard, ing.f., M. Sc.

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 181

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

*Auteur de correspondance : francois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca; 418-643-7994 p. 6629.

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 à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca
Internet : mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/recherche-developpement/

© Gouvernement du Québec

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

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 n° 181, 27 p.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 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: 978-2-550-82656-9

ISBN (PDF): 978-2-550-82657-6

F.D.C.: SD 396.5

L.C. 242--015 (714)

Notes biographiques



François Guillemette est ingénieur forestier diplômé de l'Université Laval depuis 2001. En 2002, le même établissement lui décerne un diplôme de maîtrise ès sciences. Depuis 2005, il est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière à titre de chercheur, et ses travaux portent sur la dynamique des peuplements de

feuillus après coupe partielle. Il s'intéresse plus particulièrement aux jeunes peuplements de feuillus, de même qu'aux différents systèmes de classement des feuillus sur pied (qualité, vigueur, risque de mortalité).



Martin-Michel Gauthier est ingénieur forestier, diplômé de l'Université du Nouveau-Brunswick en 2002. En 2005, l'Université Laval lui décerne un diplôme de maîtrise ès sciences. En 2008, il obtient un doctorat de l'Université Purdue (Indiana, États-Unis) sur la sylviculture et l'écophysiologie des

feuillus nobles. De 2010 à 2018, il a été à l'emploi de la Direction de la recherche forestière à titre de chercheur. Ses travaux ont touché principalement la régénération des forêts de feuillus. Depuis mai 2018, il est à l'emploi de Ressources naturelles Canada.



Steve Bédard est ingénieur forestier. Il détient une maîtrise en sciences forestières et travaille à la Direction de la recherche forestière depuis 1998. Ses recherches visent à mieux comprendre la dynamique des forêts tempérées afin de développer des scénarios sylvicoles favorisant la productivité et la résilience de ces

forêts. Il s'intéresse particulièrement aux effets de la composition et de la structure des peuplements sur la croissance des arbres, la production des peuplements et la régénération. Une autre partie de ses travaux porte sur l'évaluation et le développement de systèmes de classement des arbres selon leur vigueur et leur potentiel de production de bois d'œuvre. Ces projets ont comme objectif ultime de développer des outils tels que des modèles de croissance forestière et de prédiction du panier de produits afin de guider les aménagistes forestiers dans leurs investissements sylvicoles.

Résumé

Un dispositif expérimental a été établi dans une érablière à bouleau jaune nordique dans le but de quantifier et de comparer les effets de l'éclaircie sélective individuelle (ESI) sur la production et la régénération à ceux de la coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres (CJPG) et à un témoin sans intervention. Deux modalités d'ESI ont été étudiées : son application opérationnelle (ESIO) et une variante ajustée selon la norme pour ce traitement (ESIN). Les résultats démontrent que la plupart des critères d'application ont été respectés. L'ESI n'a pas permis de récolter significativement plus de volume de billes de grande valeur que la CJPG (6,7 et 5,7 m³·ha⁻¹, respectivement). Dans les unités des traitements CJPG, ESIO et ESIN, les accroissements annuels nets (AAN) décennaux en surface terrière (de 0,25 à 0,31 m²·ha⁻¹·an⁻¹) et en volume de billes de grande valeur (de 0,11 à 0,19 m³·ha⁻¹·an⁻¹) n'étaient pas significativement plus grands que dans les unités témoins (AAN : 0,06 m²·ha⁻¹·an⁻¹; volume de billes de grande valeur : -0,09 m³·ha⁻¹·an⁻¹). Pour l'ensemble des traitements, les arbres de la classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de 10-18 cm ont contribué beaucoup plus à l'AAN

en surface terrière que ceux de toutes les autres classes. L'accroissement décennal en DHP des tiges d'avenir de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) a été de 3,8 cm dans l'ESIO, ce qui est significativement plus que dans le peuplement témoin (2,8 cm). Dix ans après la coupe, la densité de gaules était forte pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.; environ 2000 gaules·ha⁻¹), alors qu'elle n'était que de 200 gaules·ha⁻¹ pour le bouleau jaune. Les traitements n'ont pas eu d'effet significatif sur la densité de la régénération des essences commerciales. La simulation de l'évolution de la surface terrière marchande (c.-à-d. de tous les arbres de DHP ≥ 9,1 cm) sur une période de 40 ans suggère que la CJPG et les deux variantes de l'ESI permettront de reconstituer une surface terrière suffisante (24 m²·ha⁻¹) pour envisager une prochaine récolte dans 15 à 25 ans. Toutefois, l'évolution simulée du volume des billes de grande valeur indique que seule la CJPG permettrait au volume initial (25 m³·ha⁻¹) de se reconstituer, en raison de la surface terrière plus grande après ce traitement qu'après l'ESI, surtout pour des arbres de DHP de 30-38 cm.

Mots-clés : bois d'œuvre, bouleau jaune, coupe partielle, érable à sucre, érablière nordique, rendement forestier

Abstract

*An experiment was established in a northern sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.)—yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.) stand to quantify and compare the effects of four silvicultural treatments on the stand's production and regeneration: two individual crop tree (TC) thinning treatments (an operational version [TCO] and one adjusted according to the standard [TCN]), a selection cutting (SC), and an uncut control (UC). Results showed that most application criteria of TC were met. Harvest in the TC treatment did not yield significantly more high-value sawlog volume than in SC (6.7 compared to 5.7 m³·ha⁻¹). Ten-year annual net increment was not significantly greater in TC and SC than in UC, whether it was measured in terms of basal area (0.25 to 0.31 m²·ha⁻¹·yr⁻¹) or of high-value sawlog volume (0.11 to 0.19 m³·ha⁻¹·yr⁻¹). For all treatments, the 10–18 cm diameter at breast height (DBH) class contributed much more to net increment than those*

of other DBH classes. Ten-year DBH increment of yellow birch crop trees was significantly greater in TCO than in UC (3.8 cm vs. 2.8 cm). Ten years after cutting, regeneration density was much more dense for sugar maple (approx. 2000 saplings·ha⁻¹) than for yellow birch (200 saplings·ha⁻¹). Treatments did not significantly affect the regeneration density of commercial tree species. Modeling of basal area growth over the next 40 years suggests that basal area should be sufficiently replenished (24 m²·ha⁻¹) for a subsequent harvest to be considered 15 to 25 years after SC and both TC treatments. Modeling of high-value sawlog volume, however, indicates that in the same period, the initial volume (25 m³·ha⁻¹) would be recovered only in the SC experimental units, because more residual basal area was left in this treatment than in TC, particularly in the 30–38 cm DBH class.

Keywords: forest yield, northern hardwoods, partial cut, sawlog volume, sugar maple, yellow birch

Remerciements

Ce projet a été réalisé, entre autres, grâce à la collaboration de la Coopérative forestière des Hautes-Laurentides sur le terrain, ainsi qu'au travail de l'équipe technique de la DRF, composée de MM. Jocelyn Hamel, Étienne Boulay, Jean-François Leblond, Éric Labrecque et Pierre Laurent. Des remerciements sont aussi adressés à Mme Marie-Claude Lambert pour le soutien statistique, à M. Mathieu Fortin pour des simulations avec SaMARE et à M. Filip Havreljuk pour le calcul des volumes par

produits. Les commentaires de Josianne DeBlois, responsable de la révision scientifique, et de deux évaluateurs anonymes ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit. Finalement, nous remercions Mmes Denise Tousignant, Viviane St-Arnaud, Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour l'édition finale du document. Ce projet a été financé dans le cadre du Programme de mise en valeur des ressources forestières, volet I, ainsi que par le projet de mesure des effets réels n° 142332048 de la DRF.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
Remerciements	vii
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Introduction	1
Chapitre 1 – Matériel et méthodes	3
1.1 Site d'étude.....	3
1.2 Dispositif expérimental	4
1.3 Traitements à l'étude	4
1.3.1 Éclaircies sélectives individuelles (ESIN et ESIO)	5
1.3.2 Coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres (CJPG)	5
1.3.3 Témoin sans intervention (TEM)	6
1.4 Mesures	6
1.5 Traitement des données	7
1.6 Analyses statistiques	7
1.7 Simulations de croissance	8
Chapitre 2 – Résultats	9
2.1 Portrait des traitements et évaluation selon les critères du MAF	9
2.2 Comparaison entre les traitements	9
2.2.1 Accroissements quinquennaux.....	9
2.2.2 Accroissements décennaux.....	9
2.2.3 Bouleaux jaunes d'avenir.....	13
2.2.4 Régénération.....	13
2.3 Analyse des traitements selon les indicateurs du CIMOTFF et simulations de croissance avec SaMARE.....	15
Chapitre 3 – Discussion	19
3.1 Application des traitements selon les critères du MAF	19
3.2 Comparaison entre les traitements	19
3.2.1 Accroissements quinquennaux et décennaux.....	19
3.2.2 Bouleaux jaunes d'avenir.....	20
3.2.3 Régénération	20
3.3 Analyse selon les indicateurs du CIMOTFF et simulations de croissance avec SaMARE.....	20
Conclusion	23
Références bibliographiques	25

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés physiochimiques des sols des peuplements à l'étude, par horizon	3
Tableau 2. Surface terrière totale des arbres marchands (DHP > 9,0 cm) avant et après la coupe, et surface terrière des différentes catégories de tiges, selon le traitement	10
Tableau 3. Volume marchand brut (VMB) selon le traitement et le mesurage (moyenne ± erreur type)	11
Tableau 4. Volume des billes de grande valeur ($m^3 \cdot ha^{-1}$) selon le traitement, l'essence, le produit et le mesurage	12
Tableau 5. Moyenne (Moy) et erreur type (ET) de l'accroissement annuel périodique net en surface terrière (AAN) et de ses composantes : accroissement annuel brut (AAB), accroissement annuel des vivants (AAV), accroissement annuel des recrues (AAR), mortalité annuelle périodique (MAP), selon la période et le traitement	13
Tableau 6. Résultats des analyses de variance des variables d'intérêt pour différentes périodes	14
Tableau 7. Volume des billes des grande valeur prédit à 20 ans selon le traitement et le modèle de prédiction	18

Liste des figures

Figure 1.	Photos prises à divers moments dans le dispositif expérimental : A) un peuplement après coupe d'éclaircie sélective individuelle en 2006; B) un peuplement témoin en 2010; C) une trouée avec régénération de bouleaux jaunes en 2016, dont la hauteur est restreinte par le broutement exercé par les cervidés; D) abondante régénération naturelle de l'érable à sucre en 2016.....	4
Figure 2.	Structure diamétrale en surface terrière ($m^2 \cdot ha^{-1}$) à différents mesurages selon le traitement et la façon de séparer les classes de diamètre (a-d : 10-18, 20-28, 30-38, 40-48, 50-90 cm; e-h : indicateurs de Saucier <i>et al.</i> 2014)	11
Figure 3.	Relation entre l'accroissement annuel périodique (AAP), brut (AAB) ou net (AAN) et la surface terrière résiduelle des unités expérimentales traitées.....	12
Figure 4.	Accroissement annuel net (AAN) décennal en surface terrière selon la classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) dans les unités expérimentales traitées seulement (CJPG, ESIN et ESIO) : a) en valeur absolue ($m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$); b) en proportion (%) de la surface terrière de chaque classe de DHP immédiatement après la coupe.....	16
Figure 5.	Accroissement décennal en diamètre à hauteur de poitrine (DHP, en cm) des bouleaux jaunes d'avenir éclaircis selon le traitement	16
Figure 6.	Densité moyenne de gaules (tiges $\cdot ha^{-1}$) a) de bouleau jaune, b) d'érable à sucre et c) des espèces non commerciales, selon le traitement et le moment du mesurage.....	17
Figure 7.	Accroissement annuel périodique net en surface terrière (AAN, $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) observé et prédit par le modèle de simulation SaMARE pour les périodes a) 0-5 ans, b) 5-10 ans et c) 0-10 ans	17
Figure 8.	Projections sur 40 ans du modèle de simulation SaMARE a) de la surface terrière marchande (ST, en $m^2 \cdot ha^{-1}$) et b) du volume des billes de grande valeur (en $m^3 \cdot ha^{-1}$) pour les différents traitements	18

Introduction

L'éclaircie sélective individuelle (ESI) est un traitement sylvicole qui a été introduit dans le *Manuel d'aménagement forestier* (MAF) en 2003 pour la production d'essences feuillues peu tolérantes à l'ombre (MRNFP 2003). Les instructions ministérielles qui découlaient du MAF (MRNF 2005a) décrivaient ce traitement comme une éclaircie pratiquée dans un peuplement de structure irrégulière afin de favoriser seulement les arbres reconnus comme les plus aptes à constituer le peuplement principal, quel que soit l'étage du couvert où ils se trouvaient. Historiquement, ce traitement a été appliqué par la Coopérative forestière des Hautes-Laurentides (CFHL) pour la production du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) dans des érablières à bouleau jaune et des bétulaies jaunes à sapin des aires communes 64-01 et 64-03, à raison d'environ 1000 ha par année, notamment en 2004-2005 et en 2005-2006. Afin de mieux définir les modalités d'application et d'estimer les effets réels de ce traitement, la Direction de la recherche forestière (DRF), de concert avec la CFHL, a mis en place un dispositif expérimental à l'automne 2005.

Bien que la pratique de l'ESI ait été abandonnée au cours des années suivantes, notamment à cause de la crise forestière qui a sévi, la mesure du dispositif s'est poursuivie afin d'acquérir de nouvelles

connaissances sur la sylviculture des érablières à bouleau jaune et des bétulaies jaunes à érable dans des conditions nordiques. En effet, le dispositif est situé en plein cœur du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest, ce qui représente des conditions d'extrême nordicité pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.). Le dispositif comprend aussi un traitement de coupe de jardinage et des portions témoins (sans intervention).

L'étude avait initialement deux objectifs : évaluer l'application des traitements selon les critères du MAF et comparer la production ainsi que la régénération de l'ESI à celle d'un traitement appliqué couramment dans ce type de forêt, soit la coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres (CJPG), ainsi qu'à un témoin sans intervention. De plus, afin de mieux répondre au contexte actuel, nous avons ajouté un troisième objectif, soit celui d'analyser les résultats des traitements selon la croissance projetée par le modèle SaMARE (Fortin *et al.* 2009) et selon les indicateurs proposés par le Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue (CIMOTFF, Saucier *et al.* 2014). Ces outils sont actuellement utilisés pour la préparation des prescriptions des coupes partielles en forêt décidue au Québec.

Chapitre 1

Matériel et méthodes

1.1 Site d'étude

Le dispositif est situé près de la portion sud du réservoir Mitchinamecus, dans les Hautes-Laurentides (lat. : 47,26° N.; long. : 75,15° O.). La température moyenne annuelle (1981-2010) est de 1,8 °C, et les précipitations moyennes annuelles totalisent 1 030 mm (Régnière *et al.* 2014). Le dépôt est un till indifférencié dont l'épaisseur varie de 25 à 50 cm, avec un drainage de bon à modéré et une pente de moins de 10 %. L'altitude varie de 430 à 480 m. Ce site fait partie de la région écologique 4c – Collines du Moyen-Saint-Maurice (sous-région 4c-T – Collines de la rivière Vermillon), dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau

jaune de l'Ouest (Gosselin 2002). Le type écologique dominant (FE32) est celui de l'érablière à bouleau jaune sur dépôt mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique. Certaines portions du dispositif sont à la limite du type écologique MJ12 (bétulaie jaune à sapin baumier [*Abies balsamea* (L.) Mill.] et à érable à sucre sur dépôt mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique), en raison de la forte proportion de bouleau jaune dans ces érablières. Les sols étaient peu fertiles pour l'érable à sucre, puisque la saturation en calcium de l'horizon B était de seulement 12 % (tableau 1), ce qui est bien en deçà du seuil de 28 % recommandé par Ouimet *et al.* (2013).

Tableau 1. Propriétés physiochimiques des sols des peuplements à l'étude, par horizon. Les échantillons ont été prélevés et traités en laboratoire selon les méthodes décrites dans Gauthier *et al.* (2015), six ans après la coupe.

Variable*	Unité de mesure	n [†]	Horizon H [‡]				Horizon B			
			Moy	ET	Min	Max	Moy	ET	Min	Max
MO	g·kg ⁻¹	12	832	14,9	733	892	95	4,7	70	128
pH	(-log[H ⁺])	12	4,6	0,1	4,4	5,0	5,0	0,1	4,9	5,1
C	g·kg ⁻¹	12	418	8,2	368	455	39	2,1	26	54
N	g·kg ⁻¹	12	22	0,3	21	24	2	0,1	2	3
K	mg·kg ⁻¹	12	992	58,7	695	1 430	34	2,2	20	47
Ca	mg·kg ⁻¹	12	3 254	140,9	2 730	4 470	78	7,2	41	126
Sat Ca	%	12	69	1,0	61	76	12	1,0	8	20
Mg	mg·kg ⁻¹	12	396	25,5	297	611	11	0,7	6	14
Sat Mg	%	12	35	4,1	19	66	2	0,5	1	8
Ca/Mg	Rapport	12	8	0,4	7	10	7	0,5	5	11
K/Mg	Rapport	12	3	0,1	2	3	3	0,1	3	4
Al	mg·kg ⁻¹	12	52	14,8	4	173	229	12,9	153	310
Fe	mg·kg ⁻¹	12	10	1,2	2	15	20	2,9	6	35
Acidité	mEq·100 g ⁻¹ §	12	1	0,2	0	3	3	0,1	2	3
CEC	mEq·100 g ⁻¹	12	24	0,8	20	31	3	0,2	2	4
Saturation en bases	%	12	94	1,0	89	99	19	1,1	14	28

* MO = matière organique; C = carbone; N = azote; K = potassium; Ca = calcium; Sat = saturation; Mg = magnésium; Al = aluminium; Fe = fer; CEC = capacité d'échange cationique.

† n = nombre d'échantillons.

‡ Moy = moyenne; ET = erreur type; Min = valeur minimale parmi les échantillons; Max = valeur maximale parmi les échantillons.

§ mEq·100 g⁻¹ = milli-équivalents par 100 grammes.

Le site expérimental était composé de quatre peuplements écoforestiers d'une superficie totale de 97 ha, lesquels avaient tous une structure qualifiée d'inéquienne vieille, et dont la composition était l'érable (Er), l'érable à bouleau jaune (ErBj), ou la bétulaie jaune (Bj). Avant la coupe, la surface terrière marchande (c.-à-d. de tous les arbres de DHP $\geq 9,1$ cm) dans le dispositif était en moyenne de $25,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et variait de 23 à $26,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ selon l'unité expérimentale (UE). L'érable à sucre représentait l'essence principale, avec 32 à 86 % de la surface terrière initiale (moyenne de 59 %). Le bouleau jaune venait en deuxième, avec 14 à 52 % (moyenne de 33 %). L'érable rouge (*Acer rubrum* L.), le sapin baumier, l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) étaient les autres essences commerciales observées (en moyenne, 8 % de la surface terrière). Le volume marchand brut était d'environ $200 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, dont environ 10 % était composé de billes de grande valeur. La présence de souches et l'historique d'exploitation dans ce secteur laissent croire qu'au moins une coupe à diamètre limite ciblant le bouleau jaune aurait été pratiquée dans ces peuplements par le passé.

1.2 Dispositif expérimental

L'expérience a été mise en place selon un plan en blocs complets aléatoires comprenant 12 UE réparties en 3 blocs de 4 traitements. Chaque bloc a été formé de façon à regrouper 4 UE relativement semblables sur le plan des surfaces terrières de bouleau jaune, d'érable à sucre et de l'ensemble des essences commerciales; les conditions de stations étaient très semblables pour toutes les UE. Chaque UE est de forme carrée et couvre une superficie de 1 ha, tout en étant entourée d'une bande large de 25 m, à l'intérieur de laquelle le traitement a aussi été exécuté.

1.3 Traitements à l'étude

Les traitements sylvicoles exécutés dans les peuplements à l'étude sont l'éclaircie sélective individuelle pratiquée selon la norme (ESIN, figure 1a), l'éclaircie sélective individuelle pratiquée de manière opérationnelle (ESIO), la coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres (CJPG) et un témoin sans intervention (TEM, figure 1b).

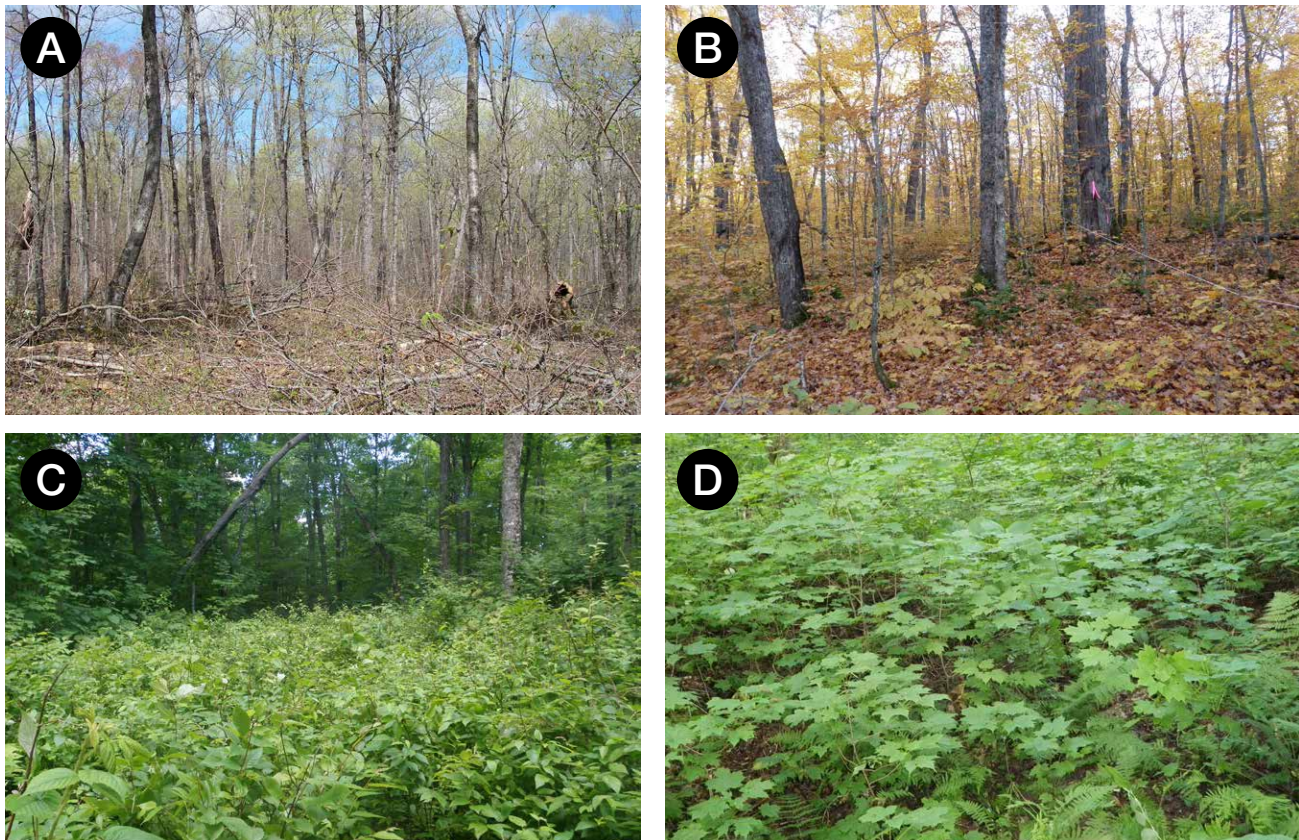


Figure 1. Photos prises à divers moments dans le dispositif expérimental : A) un peuplement après coupe d'éclaircie sélective individuelle en 2006; B) un peuplement témoin en 2010; C) une trouée avec régénération de bouleaux jaunes en 2016, dont la hauteur est restreinte par le broutement exercé par les cervidés; D) abondante régénération naturelle de l'érable à sucre en 2016 (Photos : F. Guillemette).

1.3.1 *Éclaircies sélectives individuelles (ESIN et ESIO)*

L'objet central de cette étude est la coupe d'ESI exécutée dans des érablières à bouleau jaune nordiques destinées à la production prioritaire de bouleau jaune. Selon l'analyse et l'inventaire d'intervention effectués par la CFHL, les peuplements choisis étaient admissibles pour ce traitement en vertu des critères suivants (MRNF 2005a) :

- être destinés à la production prioritaire de bouleaux, ce qui implique que les proportions de la surface terrière en bouleau jaune et en érable à sucre soient, respectivement, d'au moins 25 % et d'au plus 67 %;
- avoir une structure diamétrale irrégulière, selon la méthode d'analyse de la structure des peuplements décidus et mélangés (MRNF 2005b);
- avoir une surface terrière d'au moins 20 m²·ha⁻¹, dont 15 m²·ha⁻¹ en capital forestier (CF) et 7 m²·ha⁻¹ en capital forestier en croissance (CFC). Le CF et le CFC sont évalués à partir de la classification des arbres selon la priorité de récolte (classes M, S, C et R, Boulet 2005) et selon les essences à promouvoir : la classe M définit un arbre qui risque de mourir avant la prochaine coupe; la classe S définit un arbre qui risque de se dégrader avant la prochaine coupe; la classe C définit un arbre défectueux dont le bois marchand ne risque pas de se dégrader; finalement, la classe R définit un arbre d'avenir, sain ou peu défectueux. Le CF comprend toute la surface terrière marchande, sauf celle des arbres de la classe M. Le CFC comprend seulement la surface terrière marchande des essences à promouvoir, soit l'érable à sucre, le bouleau jaune et l'épinette blanche, et ce, lorsque leur priorité de récolte est C ou R et qu'ils ont un potentiel de produire du bois d'œuvre.

Le marquage des arbres pour le traitement ESI a été effectué par la CFHL, sur la base des instructions ministérielles (MRNF 2005a). Ce traitement visait à récolter de 30 à 40 % de la surface terrière initiale, tout en conservant au moins 80 % du CFC initial et une surface terrière résiduelle d'au moins 14 m²·ha⁻¹ en CF. Le prélèvement s'est effectué à la suite d'un martelage négatif, de manière à dégager les houppiers des arbres d'avenir (classe C ou R) parmi les bouleaux jaunes martelés positivement sur un rayon d'environ 3 m sur au moins deux des quatre faces. Aux endroits où de tels arbres étaient absents, le prélèvement a visé à récolter les arbres qui risquaient de mourir prochainement ou de se dégrader rapidement (priorités de récolte M et S,

essences peu longévives ou vulnérables au dépérissement). La récolte de ces arbres a permis de créer des ouvertures de tailles variées selon que le prélèvement se soit fait par pieds d'arbres ou par groupes d'arbres, mais la superficie maximale des groupes d'arbres n'excédait pas 400 m².

Dans deux UE de chaque bloc, nous avons évalué deux variantes du traitement d'ESI, définies en fonction des modalités de marquage des arbres. L'application de l'ESIN consistait à s'assurer que le marquage des arbres permettait d'être rigoureusement conforme aux normes du traitement dans chaque UE. Ainsi, après une première compilation des données avant la coupe, le marquage des arbres a été révisé afin de s'assurer du respect des normes. L'application de l'ESIO, quant à elle, consistait à s'assurer que le marquage des arbres était conforme aux normes du traitement, lorsque celui-ci était évalué selon les données de l'inventaire de la CFHL à l'échelle du secteur d'intervention. Il n'a pas été nécessaire de modifier ce marquage. La principale différence entre ces deux variantes de l'ESI est que la norme du traitement peut ne pas avoir été parfaitement respectée dans chaque UE pour l'ESIO, alors qu'elle l'a été pour l'ESIN.

Lorsque la surface terrière des perches de bouleau jaune (diamètre à hauteur de poitrine [DHP] de 10 à 22 cm) était de moins de 1 m²·ha⁻¹ et que la litière n'était pas suffisamment perturbée à la suite du traitement, une intervention de scarifiage était prévue dans les ouvertures afin de stimuler la régénération des espèces peu tolérantes à l'ombre (MRNF 2005a). Cette intervention a été pratiquée au début de novembre 2006, année semencière qui, selon nos observations, a été exceptionnelle pour de nombreuses essences, y compris le bouleau jaune. Cette espèce dissémine ses semences principalement durant l'automne et l'hiver (Erdmann 1990). Le scarifiage a été pratiqué dans des petites ouvertures (souvent d'environ 50 à 300 m² chacune, figure 1c) qui couvraient environ 10 à 12 % de la superficie des UE du traitement ESIN. Il a permis d'arracher la végétation en place et de perturber la litière. Les unités du traitement ESIO n'ont pas été scarifiées, autant pour diversifier les conditions de régénération pour les besoins de l'étude que pour refléter la réalité opérationnelle associée au début de la crise forestière. La couche d'humus de ces UE n'avait pas été perturbée lors de la récolte hivernale.

1.3.2 *Coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres (CJPG)*

Les peuplements sélectionnés pour la CJPG présentaient des conditions favorables à la pratique de ce traitement en 2005 : ils étaient constitués d'un

mélange d'essences tolérantes (érable à sucre) et peu tolérantes (bouleau jaune) à l'ombre, leur structure diamétrale était irrégulière, leur surface terrière totale était supérieure à 23 m²·ha⁻¹ et celle en CFC était supérieure à 9 m²·ha⁻¹ (Leak *et al.* 1987). De plus, de nombreux bouleaux jaunes et érables à sucre présentaient un potentiel de bois de sciage, en raison de leur qualité apparente et de leur diamètre. L'objectif du traitement était de prélever environ 30 % de la surface terrière initiale, de façon à récolter des bois marchands en perdition d'un point de vue sylvicole, à maintenir des conditions propices à l'éducation des arbres, à stimuler la régénération (tout particulièrement celle du bouleau jaune), à développer une structure diamétrale en forme de « J » inversé (distribution théorique de Liocourt, Majcen *et al.* 1990) et à aménager la forêt sur une période de rotation d'environ 20 ans.

Le marquage des arbres à couper dans la CPJG a été effectué par l'équipe de la DRF sur la base des principes énoncés par Majcen *et al.* (1990), puis repris dans MRN (2013). L'objectif était d'atteindre un prélèvement d'environ 7 à 8 m²·ha⁻¹ de manière à obtenir une surface terrière résiduelle d'environ 18 m²·ha⁻¹ après la coupe. Pour ce faire, un marquage a été exécuté parmi les arbres de diamètre marchand en vue d'un prélèvement d'environ 6 à 7 m²·ha⁻¹, en attribuant la priorité aux arbres non vigoureux, puis en visant à maintenir ou à bâtir une structure jardinée équilibrée et à répartir uniformément les ouvertures dans le couvert forestier. La structure visée était une distribution théorique en « J » inversé (Majcen *et al.* 1990) avec un facteur $q = 1,09$, une surface terrière résiduelle de 18 m²·ha⁻¹ et un DHP maximal de 55 cm. De petites ouvertures étaient déjà présentes naturellement dans les UE, et d'autres ont été créées par la récolte de groupes d'arbres non vigoureux. Finalement, un dernier objectif du marquage était de stimuler la régénération du bouleau jaune dans ces ouvertures. À certains endroits, des arbres non vigoureux n'ont pas été marqués, pour éviter de former de trop grandes ouvertures ou pour protéger des arbres d'avenir. Comme pour le traitement ESIN, les UE du traitement CJPG ont été scarifiées au début de novembre 2006, dans les ouvertures de 50 à 300 m² recouvrant environ 10 à 12 % de la superficie de chaque UE.

1.3.3 Témoin sans intervention (TEM)

Trois UE, d'une superficie de 1 ha chacune, ont été conservées intactes (aucune coupe) afin de permettre la comparaison des trois traitements sylvicoles avec l'évolution naturelle des peuplements.

1.4 Mesures

Tous les arbres marchands présents dans chaque UE ont été numérotés, mesurés et classés avant la coupe, après la coupe et 5 et 10 ans après la coupe. Avant la coupe, le DHP des arbres vivants a été mesuré au pied à coulisse, par classe de 2 cm, selon un même axe prédéterminé pour tous les arbres. Immédiatement après la coupe et 5 et 10 ans après la coupe, les DHP ont été mesurés au ruban diamétrique métallique, afin d'obtenir une mesure au millimètre près. Il est important de noter que ces différences de méthode de mesure peuvent parfois influencer les résultats et leur présentation; les surfaces terrières calculées au ruban diamétrique sont d'environ 1 m²·ha⁻¹ plus grandes que celles mesurées au pied à coulisse (Guillemette et Lambert 2009).

Les autres variables mesurées sont : l'essence, l'état (vivant martelé ou non, mort, coupé, recrue), la vigueur (classes 1, 2, 3, 4, 5 ou 6; Majcen *et al.* 1990), le marquage (positif, négatif ou aucun), la priorité de récolte (classes M, S, C ou R; Boulet 2005) et la classe de qualité de la bille de pied des feuillus de DHP $\geq 23,1$ cm (classes A, B, C ou D; MRNFP 2004). Le fait que le martelage de l'ESI ait été exécuté avant l'installation du dispositif a permis de noter, dans les UE des traitements CJPG et témoin, quels bouleaux jaunes d'avenir (martelage positif) auraient été dégagés si ces UE avaient été traitées en ESI.

La hauteur de 282 arbres-études a aussi été mesurée afin de construire des relations hauteur-diamètre locales (Guillemette *et al.* 2007). Ces relations ont été utilisées pour estimer la hauteur de l'ensemble des arbres du dispositif afin de calculer le volume marchand brut (Perron 2003). Le volume des billes de grande valeur pour l'érable à sucre et le bouleau jaune a aussi été estimé à l'échelle du peuplement à l'aide des modèles développés par Havreljuk *et al.* (2015) en utilisant la classe de vigueur comme variable explicative. Ce volume correspond à la somme du volume des billes de sciage de qualité F1 et F2 (Petro et Calvert 1976), de même que du volume des billes de déroulage.

Finalement, un inventaire d'échantillonnage des gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm) a été effectué après la coupe en mai 2006, après le scarifiage des traitements CJPG et ESIN en novembre 2006 ainsi qu'après 5 et 10 ans. Les essences ont été dénombrées par classe de 2 cm de DHP (1,1-3,0 cm, 3,1-5,0 cm, 5,1-7,0 cm, 7,1-9,0 cm) dans 16 placettes circulaires de 40 m² par UE.

1.5 Traitement des données

La structure du peuplement forestier de chaque UE a été décrite de deux façons. D'abord, la surface terrière occupée par l'ensemble des arbres a été calculée par classe de DHP de 10 cm, de celle de 10-18 cm jusqu'à la dernière classe (de 50 à 90 cm). Ensuite, la surface terrière a été calculée selon les indicateurs suggérés par le CIMOTFF (Saucier *et al.* 2014), soit les trois classes suivantes : les « 10-22 », comprenant les érables à sucre, les bouleaux jaunes et les bouleaux à papier d'un DHP de 9,1 à 23,0 cm; les « 24-44 », comprenant les arbres de ces mêmes essences, mais d'un DHP de 23,1 à 45,0 cm et inclus dans le CFC; enfin, les « 46-90 », comprenant les arbres des mêmes essences et d'un DHP de plus de 45,0 cm.

Les composantes de l'accroissement annuel périodique en surface terrière ont été calculées à l'échelle de l'UE à partir des mesures d'arbres, selon les formules d'Erdmann et Oberg (1973) :

- accroissement annuel périodique des arbres vivants (AAV) : augmentation de la surface terrière des arbres qui avaient un DHP $\geq 9,1$ cm au moment de la mesure après la coupe, et qui étaient toujours vivants lors du suivi;
- accroissement annuel périodique des recrues (AAR) : surface terrière des arbres dont le DHP a atteint 9,1 cm au cours de la période de suivi;
- accroissement annuel périodique brut (AAB) : AAV + AAR;
- mortalité annuelle périodique (MAP) : surface terrière des arbres qui étaient vivants après la coupe et qui sont morts au cours de la période de suivi;
- accroissement annuel périodique net (AAN) : AAB – MAP.

1.6 Analyses statistiques

Une analyse de variance linéaire mixte avec mesures répétées a été utilisée avec le progiciel SAS (SAS Institute inc., version 9.4) pour analyser les composantes de l'accroissement annuel quinquennal. Le modèle statistique utilisé était le suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + (B \times T)_{ij} + P_k + (T \times P)_{jk} + C_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

où Y_{ijk} correspond à la variable dépendante (AAN, AAV, AAB, AAR, MAP),

μ est la moyenne globale,

B_i est l'effet aléatoire du bloc i
($i = 1, 2, 3; B_i \sim N(0, \sigma_B^2)$),

T_j est l'effet fixe du traitement j ($j = \text{CJPG, ESIN, ESIO, TEM}$),

$(B \times T)_{ij}$ est l'effet aléatoire de l'interaction entre le bloc i et le traitement j ,

P_k correspond à l'effet fixe de la période de temps k ($k = 1$ [0-5 ans], 2 [5-10 ans]),

$(T \times P)_{jk}$ est l'effet fixe de l'interaction entre le traitement j et la période k ,

C_{ijk} correspond à la valeur avant coupe à titre de covariable, et

ε_{ijk} est l'erreur expérimentale.

En ce sens, $\varepsilon_{ij} = [\varepsilon_{ij0-5} \ \varepsilon_{ij0-10}]$ représente le vecteur d'erreur 2×1 correspondant aux mesures répétées du traitement j dans le bloc i . De plus, $\varepsilon_{ij} \sim iid N(0, \Sigma)$ où Σ correspond à la matrice de variance-covariance autorégressive de premier ordre [AR(1)] qui tient compte de la corrélation entre les mesures effectuées sur une même UE. Lorsque non significative, la covariable était enlevée du modèle.

Pour l'analyse de l'accroissement annuel décennal (0-10 ans) en surface terrière et en volume de billes de grande valeur, le modèle utilisé était similaire, mais comme il n'y avait pas de mesures répétées, les termes P_k et $(T \times P)_{jk}$ ont été enlevés. Le volume a été analysé séparément pour le bouleau jaune et l'érable à sucre, de même que globalement pour les deux essences prises ensemble. Pour la surface terrière, des analyses supplémentaires ont été effectuées à l'échelle de l'UE afin de déterminer si la relation entre l'AAN ou l'AAB et la surface terrière résiduelle (ST_{res}) était linéaire ou quadratique. Le modèle statistique utilisé était le suivant :

$$Y_{ij} = \mu + B_i + ST_{res-ij} + ST_{res-ij}^2 + \varepsilon_{ij}$$

où Y_{ij} correspond à l'accroissement annuel net (AAN) ou brut (AAB) en surface terrière,

μ représente la moyenne globale,

B_i est l'effet aléatoire du bloc i ($i = 1, 2, 3$; et correspondent respectivement à l'effet fixe linéaire et quadratique de la surface terrière résiduelle de l'UE ayant reçu le traitement j ($j = \text{CJPG, ESIN, ESIO, TEM}$) dans le bloc i , et

ε_{ij} est l'erreur expérimentale.

Le volume récolté de billes de grande valeur a été analysé en valeur absolue (volume avant la coupe [AVC] – volume après la coupe [APC, en $m^2 \cdot ha^{-1}$]), ainsi qu'en valeur relative (volume récolté/volume AVC $\times 100$, en %). De plus, le témoin a été retiré du modèle puisqu'aucune récolte n'a été faite dans ce traitement. Le bouleau jaune et l'érable à sucre ont été analysés séparément, puis ensemble.

Pour les analyses de l'AAN décennal en valeur absolue ($m^2 \cdot ha^{-1}$) et en valeur relative (%) selon la classe de DHP (0-10 ans), l'effet de la classe de DHP, D_l ($l = 10-18, 20-28, 30-38, 40-48$ et $50-90$ cm) ainsi que son interaction avec le traitement $(T \times D)_{ij}$ ont été ajoutés au modèle. Toutefois, le traitement témoin a été retiré du modèle afin de mieux faire ressortir la répartition de l'AAN dans les coupes partielles. L'accroissement décennal en DHP des bouleaux jaunes d'avenir (valeur absolue seulement, en cm), quant à lui, a été analysé de la même manière que les accroissements annuels décennaux en surface terrière.

Pour l'analyse des gaules, le modèle était semblable à celui présenté dans l'équation 1, mais la matrice de variance-covariance correspondait à la matrice spatiale avec la fonction puissance (SP[POW]) parce que le temps écoulé n'était pas égal d'une mesure à l'autre. Lorsque la période ou l'interaction entre les traitements et la période était significative, des tests à l'aide de contrastes ont permis de déterminer si la relation dans le temps était linéaire ou quadratique. Les gaules de bouleau jaune et celles d'érable à sucre ont été analysées séparément. De plus, les espèces non commerciales suivantes ont été regroupées pour les besoins de l'analyse : le noisetier à long bec (*Corylus cornuta* Marsh.), l'érable à épis (*Acer spicatum* Lam.), la viorne à feuilles d'aulne (*Viburnum alnifolium* Marsh.), le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L.), le sorbier d'Amérique (*Sorbus americana* Marsh.), le sureau du Canada (*Sambucus canadensis* L.) et l'érable de Pennsylvanie (*Acer pensylvanicum* L.).

Lorsqu'un effet simple était significatif ($p < 0,05$), les comparaisons multiples ont été effectuées en comparant 2 à 2 les niveaux de l'effet parce que toutes les comparaisons étaient d'intérêt. Lorsque l'interaction traitement \times période était significative,

nous avons testé seulement les comparaisons d'intérêt, soit les traitements 2 à 2 pour chacune des périodes ainsi que les périodes 2 à 2 pour chacun des traitements. Dans les deux cas, la valeur p des comparaisons multiples a été ajustée selon une méthode de simulation (Westfall *et al.* 2011) afin de tenir compte de la multiplicité des tests. L'homogénéité de la variance et la normalité des résidus ont été vérifiées en utilisant les graphiques des résidus standardisés. Une transformation logarithmique a été utilisée pour analyser la mortalité décennale et la densité des gaules de bouleau jaune. Une transformation racine carrée a été utilisée pour analyser le volume récolté des billes de grande valeur. Même si des tests statistiques ont été occasionnellement réalisés sur des valeurs transformées, nous présentons les valeurs (moyennes et erreurs types [ET]) sur l'échelle d'origine dans les résultats.

1.7 Simulations de croissance

Le modèle de croissance SaMARE 2006 (Fortin *et al.* 2009) a servi pour prédire l'évolution de ce dispositif. La comparaison des valeurs prédites avec les valeurs observées pour les deux premières périodes quinquennales et la moyenne décennale fournit un aperçu de l'évolution anticipée sur 40 ans. L'AAN a été utilisé pour les deux périodes quinquennales parce qu'il est plus difficile à simuler que la surface terrière en valeur absolue, laquelle est grandement déterminée par sa valeur au début de la période d'évolution (Gauthier *et al.* 2016). Les biais et erreurs n'ont pas été calculés, puisqu'il faut au moins 30 observations pour en obtenir des estimations précises (Fortin et Langevin 2010).

De plus, nous avons utilisé les régressions linéaires proposées par le CIMOTFF (Saucier *et al.* 2014, leurs figures 3.4 et 3.5) pour évaluer le temps nécessaire pour reconstituer un volume de bois d'œuvre de grande valeur suffisant pour qu'une seconde coupe partielle soit pratiquée. Ces régressions ont été étalonnées à partir de résultats de simulations de SaMARE afin d'établir quelles variables déterminent le rendement. Elles sont actuellement utilisées dans la préparation des prescriptions sylvicoles afin d'obtenir une évaluation simple et rapide du rendement escompté.

Chapitre 2

Résultats

2.1 Portrait des traitements et évaluation selon les critères du MAF

Les UE traitées selon l'ESIN et l'ESIO avaient des caractéristiques moyennes semblables. Pour ces deux modalités, $9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (36 %) de la surface terrière (tableau 2) et $71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (36 %) du volume marchand brut ont été prélevés (tableau 3), et la surface terrière résiduelle était d'environ $16 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (tableau 2). Le martelage positif a ciblé en moyenne (\pm erreur type [ET]) 30 ± 4 bouleaux jaunes d'avenir à l'hectare à dégager. Ces arbres avaient un DHP moyen de 37,8 cm (étendue : de 16,0 cm à 73,6 cm). La plupart des critères du MAF (MRNFP 2003) pour l'ESI ont été respectés dans les 6 UE traitées, à l'exception de la surface terrière résiduelle de CF (c'est-à-dire celle excluant seulement les arbres de priorité de récolte M) : elle devait être supérieure à $14 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, mais n'a atteint que 12,7 à $13,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans 5 cas sur 6 (tableau 2).

Dans le traitement CJPG, le prélèvement a été de $7,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (29 %) en surface terrière (tableau 2) et de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (29 %) en volume marchand brut (tableau 3). La surface terrière résiduelle de CF (de 14,6 à $16,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, tableau 2) était supérieure à $14 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans les 3 UE ayant reçu ce traitement.

Dans tous les traitements, la récolte s'est effectuée principalement dans les classes de $\text{DHP} \geq 30$ cm, ce qui a laissé des structures diamétrales irrégulières assez semblables pour les trois traitements (figure 2b, f). Le marquage a ciblé la récolte prioritaire des arbres classés M, soit environ $6,4$ et $5,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour la CJPG et l'ESI, respectivement (soit 85 % des $7,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ coupés dans la CJPG et 66 % des $9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ coupés dans les ESI, tableau 2). D'ailleurs, la proportion des arbres classés M est passée de 34 à 14 % de la surface terrière à la suite des traitements (non illustré). Avant la coupe, le volume des billes de grande valeur était en moyenne de $23 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, tous traitements confondus (détails par traitement au tableau 4), et était composé à 49 % de bouleau jaune et à 51 % d'érable à sucre. En général, les prélèvements ont peu influencé la composition en essences, qui est demeurée dominée par l'érable à sucre après la coupe (tableau 2). Les tiges de DHP de 24-44 cm occupaient une plus grande surface terrière dans la CJPG que dans l'ESI, avant (figure 2e) comme après la coupe (figure 2f).

2.2 Comparaison entre les traitements

2.2.1 Accroissements quinquennaux

Lors de la deuxième période quinquennale, l'AAN a été semblable dans les traitements de CJPG et d'ESIO (de 0,31 à $0,33 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$), mais significativement plus grand dans ceux-ci que dans le traitement témoin ($-0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$; tableaux 5 et 6). Nous n'avons pas décelé de différence significative de l'AAN entre l'ESIN ($0,20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et les autres traitements pour la même période ($p \geq 0,160$). Par ailleurs, une baisse significative de l'AAN de la première à la deuxième période quinquennale a été décelée pour le témoin sans intervention (tableau 5). L'AAR et la MAP moyens ont connu une légère augmentation significative entre la première et la deuxième période quinquennale (tableau 5). Il n'y a pas eu de différences significatives de l'AAV et de l'AAB.

2.2.2 Accroissements décennaux

Un effet du traitement a été décelé pour l'AAN décennal ($p = 0,046$, tableau 6), mais aucune comparaison multiple ne s'est avérée significative (tableau 5). Toutefois, deux de celles-ci étaient très près de l'être (ESIO vs TEM : $p = 0,053$; et CJPG vs TEM : $p = 0,058$). L'AAN était de 0,25 à $0,31 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ dans les UE traitées et de $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ dans les UE témoins, mais la variabilité était grande dans tous les cas (erreur type jusqu'à $0,08 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, tableau 5). Nous n'avons pas trouvé d'effet significatif du traitement pour les autres composantes de l'accroissement décennal (tableaux 5 et 6), ni de relation linéaire ou quadratique entre l'AAB ou l'AAN et la surface terrière résiduelle dans les UE traitées (tableau 6, figure 3).

Dans les UE traitées, les arbres de la classe de DHP de 10-18 cm ont contribué beaucoup plus à l'AAN décennal que ceux des autres classes : $0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, soit 69 % de la surface terrière de cette même classe après la coupe (figure 4). Par ailleurs, la contribution des classes de 40-48 et de 50-90 cm était pratiquement nulle, c'est-à-dire que l'AAV était semblable à la MAP pour la période décennale (figure 4).

Tableau 2. Surface terrière totale des arbres marchands (DHP > 9,0 cm) avant et après la coupe, et surface terrière des différentes catégories de tiges, selon le traitement. Les surfaces terrières ont été calculées à partir des DHP mesurés au pied à coulisse avant la coupe.

Trt*	Bloc	Unité	Période†	Arbres marchands		Composition(%)‡				Classe de priorité de récolte (m ² .ha ⁻¹)					
				Surface terrière (m ² .ha ⁻¹)	Intensité de la coupe (m ² .ha ⁻¹) %	ERS	BOJ	Rés.	CF ^s (m ² .ha ⁻¹)	CFC ^s (m ² .ha ⁻¹)	Bois d'œuvre (DHP > 23 cm) (m ² .ha ⁻¹)	M	S	C, R	
CJPG	1	A3	AVC	25,4	7,1	28	40	52	1	15,4	11,5	20,6	10,3	3,1	12,7
		APC	18,3			38	55	2	14,6	11,2	14,9	3,6	2,8	11,9	
	2	A4	AVC	26,8	7,9	29	86	14	0	17,8	12,3	19,5	9	4,8	12,9
		APC	18,9			88	11	0	16,5	12,1	14,5	2,4	3,8	12,7	
	3	B4	AVC	25,1	7,5	30	68	29	1	17,7	13,4	19,5	7,3	3,7	14,0
		APC	17,6			66	33	1	16,1	13,2	13,5	1,5	2,3	13,8	
	Moyenne		AVC	25,8	7,5	29,0	65	32	1	17,0	12,4	19,9	8,9	3,9	13,2
			APC	18,3			64	33	1	15,7	12,2	14,3	2,5	3,0	12,8
ESIN	1	C1	AVC	23,4	8,3	35	37	42	11	15,0	9,1	15,6	8,5	3,9	11,1
		APC	15,1			40	41	6	12,7	8,6	10,4	2,5	2,6	10	
	2	C2	AVC	25,6	9,1	36	73	20	3	16,0	10,7	20,8	9,6	4,8	11,3
		APC	16,5			70	24	3	13,7	9,9	12,9	2,8	3,3	10,4	
	3	B2	AVC	26,8	9,4	35	59	35	1	20,7	12,9	21,7	6,1	7,3	13,4
		APC	17,4			54	40	1	15,8	12,0	13,2	1,6	3,3	12,5	
	Moyenne		AVC	25,3	8,9	35,3	56	32	5	17,2	10,9	19,4	8,1	5,3	11,9
			APC	16,3			55	35	3	14,1	10,2	12,2	2,3	3,1	11,0
ESIO	1	C4	AVC	23,0	7,8	34	49	41	5	16,1	11,0	16,8	6,8	4,4	11,7
		APC	15,2			48	45	2	13,0	10,4	10,7	2,2	2,1	10,9	
	2	A2	AVC	24,7	8,6	35	77	22	0	15,8	10,6	19,7	8,9	4,6	11,2
		APC	16,1			77	22	0	13,6	9,8	12,8	2,4	3,3	10,4	
	3	B1	AVC	26,5	10,7	40	36	49	7	16,9	11,0	17,8	9,6	4,5	12,4
		APC	15,8			39	48	4	13,1	9,9	9,9	2,7	2,0	11,2	
	Moyenne		AVC	24,7	9,0	36,3	54	37	4	16,3	10,9	18,1	8,4	4,5	11,8
			APC	15,7			55	38	2	13,2	10,0	11,1	2,4	2,5	10,8
TEM	1	C3	AVC	23,3	s.o.	s.o.	32	49	5	15,4	10,8	17,3	7,5	3,4	12,0
		A1	AVC	25,8	s.o.	s.o.	78	22	0	17,2	12,7	21,1	8,6	4,1	13,1
	3	B3	AVC	26,0	s.o.	s.o.	65	29	1	19,5	14,7	20,7	5,9	4,2	15,3
		Moyenne	AVC	25,0	s.o.	s.o.	58	33	2	17,4	12,7	19,7	7,3	3,9	13,5

* Trt = traitement sylvicole; CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

† AVC = avant la coupe; APC = après la coupe;

‡ ERS = érable à sucre; BOJ = bouleau jaune; Rés. = essences résineuses.

§ CF = capital forestier; CFC = capital forestier en croissance.

|| Les classes de priorité de récolte M, S, C et R (Boulet 2005) sont définies à la section 2.3.1.

Tableau 3. Volume marchand brut (VMB) selon le traitement et le mesurage (moyenne ± erreur type). La proportion (%) récoltée pendant la coupe est aussi présentée entre parenthèses.

Traitement*	VMB (m ³ .ha ⁻¹)					
	AVC†	APC†	Récolté	5 ans APC	10 ans APC	Accroissement décennal
CJPG	203 ± 4	143 ± 3	60 (29 %) ± 1	155 ± 2	168 ± 1	25 ± 2
ESIN	200 ± 8	129 ± 6	71 (35 %) ± 3	139 ± 4	146 ± 6	17 ± 6
ESIO	193 ± 8	121 ± 1	72 (37 %) ± 8	133 ± 3	145 ± 3	24 ± 2
TEM	206 ± 5	203 ± 5	— —	210 ± 7	208 ± 9	5 ± 6

* CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

† AVC = avant la coupe; APC = après la coupe.

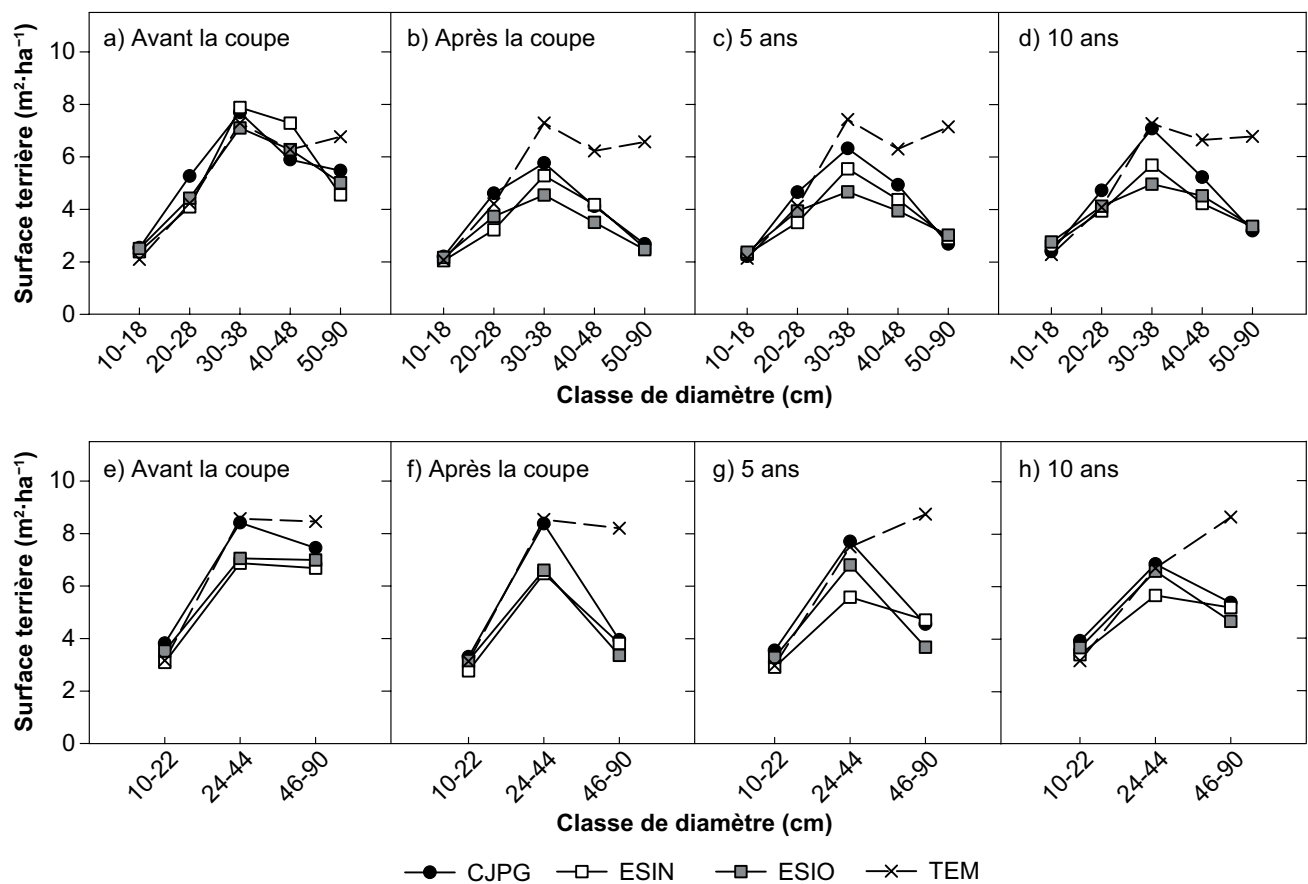


Figure 2. Structure diamétrale en surface terrière (m².ha⁻¹) à différents mesurages selon le traitement et la façon de séparer les classes de diamètre (a-d : 10-18, 20-28, 30-38, 40-48, 50-90 cm; e-h : indicateurs de Saucier *et al.* 2014). Les surfaces terrières ont été calculées à partir des diamètres à hauteur de poitrine mesurés au ruban diamétrique, sauf pour les arbres récoltés inclus dans les mesures prises avant la coupe (qui ont été mesurés au pied à coulisse). CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

Tableau 4. Volume des billes de grande valeur ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) selon le traitement, l'essence, le produit et le mesurage. Les chiffres entre parenthèses représentent la proportion récoltée pendant la coupe. La classe de déroulage (DER) représentait généralement 10 % du volume total de billes de grande valeur, alors que le volume en produit F1 représentait 15 %.

Traitement*	Essence et produit†	Volume des billes de grande valeur ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$)						
		AVC‡	APC‡	Récolté	5 ans	10 ans	Accroissement décennal	
CJPG	BOJ, F1 et DER	3,7	3,2	0,5 (12 %)	3,4	3,6	0,34	
	BOJ, F2	7,8	6,5	1,3 (17 %)	6,7	7,1	0,59	
	ERS, F1	2,1	1,3	0,8 (38 %)	1,3	1,3	0,03	
	ERS, F2	10,1	6,9	3,2 (31 %)	7,4	7,5	0,65	
	Total	23,6	17,9	5,7 (24 %)	18,8	19,5	1,61	
ESIN	BOJ, F1 et DER	3,4	2,9	0,5 (16 %)	2,9	3,1	0,21	
	BOJ, F2	7,2	5,8	1,4 (20 %)	6,0	6,3	0,44	
	ERS, F1	2,3	1,5	0,8 (35 %)	1,5	1,6	0,07	
	ERS, F2	10,1	6,3	3,8 (38 %)	6,4	6,6	0,38	
	Total	23,1	16,5	6,6 (29 %)	16,9	17,6	1,10	
ESIO	BOJ, F1 et DER	3,6	2,9	0,7 (20 %)	2,9	3,3	0,45	
	BOJ, F2	8,0	6,0	2,0 (25 %)	6,2	6,9	0,90	
	ERS, F1	2,1	1,3	0,8 (39 %)	1,3	1,2	-0,01	
	ERS, F2	8,1	5,0	3,1 (38 %)	5,4	5,5	0,53	
	Total	21,7	15,1	6,7 (31 %)	15,7	16,9	1,86	
TEM	BOJ, F1 et DER	3,8	3,8	— —	4,1	4,2	0,38	
	BOJ, F2	8,3	8,3	— —	8,7	8,9	0,58	
	ERS, F1	2,6	2,5	— —	2,5	2,1	-0,46	
	ERS, F2	10,8	10,7	— —	10,4	9,3	-1,40	
	Total	25,4	25,3	— —	25,6	24,4	-0,90	

* CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

† BOJ = bouleau jaune; ERS = érable à sucre; F1 et F2 = deux classes de billes de grande valeur selon Petro et Calvert (1976); DER = déroulage.

‡ AVC = avant la coupe; APC = après la coupe.

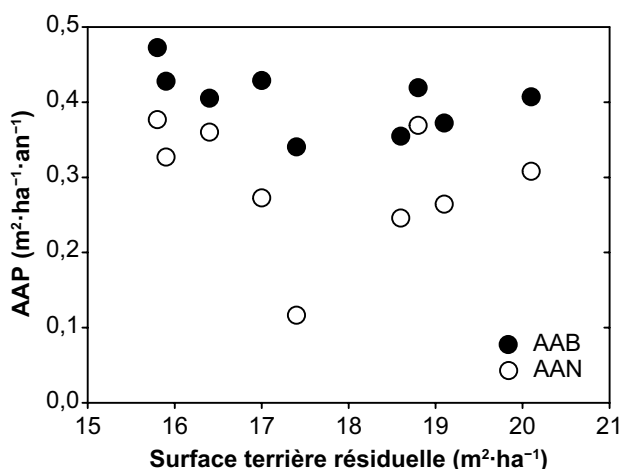


Figure 3. Relation entre l'accroissement annuel périodique (AAP), brut (AAB) ou net (AAN) et la surface terrière résiduelle des unités expérimentales traitées. Les surfaces terrières ont été calculées à partir des DHP mesurés au ruban diamétrique.

L'ESI n'a pas permis de récolter significativement plus de volume de billes de grande valeur par rapport à la CJPG, que ce soit en valeur absolue (6,7 comparativement à 5,7 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) ou en proportion du volume avant la coupe, que les essences soient analysées séparément ou ensemble (tableaux 5 et 6). L'accroissement annuel moyen décennal en volume de billes de grande valeur du bouleau jaune, de l'érable à sucre et des deux essences combinées n'était pas significativement différent selon les traitements (tableau 6). Toutes essences confondues, il était en moyenne de 0,16 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans la CJPG, de 0,11 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans l'ESIN, de 0,19 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans l'ESIO et de -0,09 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans le témoin (tableau 4). À titre comparatif, l'accroissement annuel moyen décennal en VMB variait de 1,7 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ à 2,5 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans les unités traitées (tableau 3).

Tableau 5. Moyenne (Moy) et erreur type (ET) de l'accroissement annuel périodique net en surface terrière (AAN) et de ses composantes : accroissement annuel brut (AAB), accroissement annuel des vivants (AAV), accroissement annuel des recrues (AAR), mortalité annuelle périodique (MAP), selon la période et le traitement. Pour une même période, les moyennes dont les lettres ne sont pas les mêmes diffèrent de manière significative ($p < 0,05$).

Période	Traitement*	Accroissement en surface terrière (m ² ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)									
		AAN		AAB		AAV		AAR		MAP	
		Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
0-5 ans	CJPG	0,29	0,05	0,38	0,03	0,34	0,02	0,04	0,01	0,10	0,03
	ESIN	0,27	0,06	0,37	0,04	0,31	0,04	0,05	0,01	0,10	0,02
	ESIO	0,31	0,06	0,39	0,01	0,34	0,01	0,06	0,01	0,09	0,05
	TEM	0,15 [†]	0,08	0,37	0,01	0,33	0,01	0,04	0,01	0,21	0,08
	Tous	0,25	0,06	0,38	0,02	0,33	0,02	0,05[†]	0,01	0,12[†]	0,04
5-10 ans	CJPG	0,33 a	0,01	0,40	0,01	0,34	0,01	0,06	0,01	0,08	0,02
	ESIN	0,20 ab	0,10	0,39	0,04	0,30	0,04	0,09	0,02	0,19	0,07
	ESIO	0,31 a	0,01	0,43	0,02	0,35	0,01	0,07	0,01	0,12	0,02
	TEM	-0,05 b [†]	0,06	0,31	0,03	0,27	0,03	0,04	0,01	0,35	0,08
	Tous	0,20	0,05	0,38	0,02	0,32	0,02	0,07[†]	0,01	0,19[†]	0,05
0-10 ans	CJPG	0,31	0,03	0,40	0,01	0,34	0,01	0,06	0,01	0,09	0,02
	ESIN	0,25	0,08	0,39	0,04	0,31	0,04	0,08	0,02	0,14	0,04
	ESIO	0,31	0,03	0,42	0,01	0,34	0,01	0,08	0,01	0,10	0,03
	TEM	0,06	0,07	0,34	0,01	0,29	0,02	0,05	0,01	0,28	0,08

* CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

[†] Pour un même traitement, les moyennes suivies d'un obèle (†) diffèrent de manière significative entre la période 0-5 ans et la période 5-10 ans. Les surfaces terrières ont été calculées à partir des diamètres à hauteur de poitrine mesurés au ruban diamétrique.

2.2.3 Bouleaux jaunes d'avenir

Le taux décennal de survie des bouleaux jaunes d'avenir était semblable (en moyenne, de 93 à 97 %) dans tous les traitements, y compris le témoin. L'accroissement décennal moyen en DHP du bouleau jaune dans le traitement ESIO (3,8 cm) était significativement plus grand que dans le témoin (2,8 cm), mais comparable à ceux dans les deux autres traitements (figure 5).

2.2.4 Régénération

La densité des gaules d'érable à sucre était forte dans ce dispositif, avec environ 1500 gaules·ha⁻¹ après la coupe (figure 6b), ce qui représente 70 % du nombre total de gaules, alors que le bouleau jaune en représentait seulement 5 %. La répartition selon la classe de DHP était d'environ 1000, 300, 100 et 100 gaules·ha⁻¹ dans les classes de DHP de 2, 4, 6 et 8 cm, respectivement. La densité des espèces non commerciales était de 500 gaules·ha⁻¹, ce qui représente 25 % du total. Les espèces non commerciales les plus abondantes étaient le noisetier à long bec (env. 170 gaules·ha⁻¹), l'érable à épis (env. 160 gaules·ha⁻¹) et la viorne à feuilles d'aulne (env. 30 gaules·ha⁻¹).

En ce qui a trait aux changements à plus long terme, une faible augmentation linéaire de la densité des gaules de bouleau jaune a été décelée ($p = 0,007$, tableau 6) : la moyenne de l'ensemble des traitements est passée d'environ 70 gaules·ha⁻¹ après la coupe à 200 gaules·ha⁻¹ après 10 ans (figure 6a). La densité de gaules d'érable à sucre et celle des espèces non commerciales ont augmenté selon une relation quadratique après les trois traitements de coupe ($p < 0,035$, tableau 6, figure 6b-c), atteignant respectivement 2000 et 2600 gaules·ha⁻¹, 10 ans après la coupe. Ce type de relation indique que la densité était à son minimum après la coupe et qu'elle a augmenté par la suite, mais plus rapidement pendant la seconde que dans la première période quinquennale. Nous n'avons décelé aucune relation linéaire ou quadratique pour la densité des gaules d'érable à sucre et des essences non commerciales dans les unités témoins ($p > 0,509$, tableau 6). La seule différence significative observée entre les traitements a été la densité des espèces non commerciales après 10 ans, laquelle était significativement plus forte dans les deux ESI que dans le témoin (figure 6c).

Tableau 6. Résultats des analyses de variance des variables d'intérêt pour différentes périodes. Les valeurs de p en gras correspondent aux effets statistiquement significatifs ($p < 0,05$).

Période*	Variabes†	Effet‡	dl num§	dl den	Valeur de F	Valeur de p
Quinquennale	AAN	T	3	6	4,81	0,049
		P	1	8	4,58	0,065
		T × P	3	8	4,08	0,049
	AAB	T	3	6	1,95	0,223
		P	1	8	0,16	0,700
		T × P	3	8	3,31	0,078
	AAV	T	3	6	1,23	0,377
		P	1	8	2,66	0,142
		T × P	3	8	3,34	0,077
	AAR	T	3	6	3,16	0,302
		P	1	8	10,93	0,011
		T × P	3	8	1,71	0,241
	MAP	T	3	6	3,37	0,096
		P	1	8	7,13	0,028
		T × P	3	8	2,45	0,139
Décennale	AAN	T	3	6	4,98	0,046
	AAB	T	3	6	2,22	0,187
	AAV	T	3	6	1,30	0,357
	AAR	T	3	6	4,04	0,069
	MAP	T	3	6	3,28	0,100 [#]
	AAN vs. ST_{res}	ST_{res}	1	4	2,55	0,186
		ST_{res}^2	1	4	2,49	0,190
	AAB vs. ST_{res}	ST_{res}	1	4	7,60	0,051
		ST_{res}^2	1	4	7,32	0,054
	AVC – APC (m ³ ·ha ⁻¹)	Volume billes de grande valeur récoltées	T	2	4	0,31
BOJ seulement		T	2	4	0,67	0,561
ERS seulement		T	2	4	0,03	0,966
AVC – APC (%)	Volume billes de grande valeur récoltées	T	2	4	3,10	0,154 [#]
	BOJ seulement	T	2	4	0,95	0,461
	ERS seulement	T	2	4	0,75	0,529
Décennale	Acc volume billes de grande valeur	T	3	6	2,54	0,153
	BOJ seulement	T	3	6	0,24	0,862
	ERS seulement	T	3	6	5,00	0,045[¶]
Décennale	AAN	T	2	4	0,68	0,556
		Classe DHP (D)	4	24	42,57	<0,001
		T × D	8	24	1,11	0,391
	AAN (%)	T	2	4	0,29	0,760
		D	4	24	42,23	<0,001
		T × D	8	24	0,84	0,574
	Accroissement DHP BOJ avenir	T	3	6	5,01	0,045

Tableau 6. (suite et fin)

Période*	Variables†	Effet‡	dl num§	dl den	Valeur de F	Valeur de p
Quinquennale	Gaules BOJ	T	3	6	0,21	0,883#
		P	3	24	7,61	0,001
		P : lin	1	24	0,433	0,007
		P : quad	1	24	0,145	0,098
		T × P	9	24	2,14	0,066
		T × P	9	24	2,14	0,066
	Gaules ERS	T	3	6	0,10	0,957
		P	3	24	20,72	< 0,001
		T × P	9	24	8,84	< 0,001
		CJPG quad	1	24	4,75	0,002
		ESIN quad	1	24	4,84	< 0,001
		ESIO quad	1	24	5,00	< 0,001
	Gaules NON COM	TEM quad	1	24	-2,04	0,509
		TEM lin	1	24	-1,26	0,936
		T	3	6	1,88	0,234
		P	3	24	29,41	< 0,001
		T × P	9	24	4,14	0,003
		CJPG quad	1	24	4,01	0,012
	ESIN quad	1	24	3,55	0,035	
	ESIO quad	1	24	6,35	< 0,001	
	TEM quad	1	24	0,80	0,999	
	TEM lin	1	24	0,66	0,999	

* AVC = avant la coupe; APC = après la coupe.

† AAN = accroissement annuel périodique net en surface terrière; AAB = accroissement annuel périodique brut en surface terrière; AAV = accroissement annuel périodique en surface terrière des arbres vivants; AAR = accroissement annuel périodique en surface terrière des recrues; MAP = mortalité annuelle périodique en surface terrière; ST_{res} = surface terrière résiduelle; BOJ = bouleau jaune; ERS = érable à sucre; Acc = accroissement; DHP = diamètre à hauteur de poitrine; NON COM = espèces non commerciales.

‡ T = traitement; P = période; lin = linéaire; quad = quadratique; CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

§ dl num = degrés de liberté au numérateur; dl den = degrés de liberté au dénominateur.

|| Comprend seulement les traitements CJPG, ESIN et ESIO.

¶ Aucune différence significative n'a été décelée lors des comparaisons multiples entre les traitements.

Une transformation logarithmique a été utilisée pour analyser la mortalité décennale et la densité des gaules de bouleau jaune. Une transformation racine carrée a été utilisée pour analyser le volume récolté des billes de grande valeur.

2.3 Analyse des traitements selon les indicateurs du CIMOTFF et simulations de croissance avec SaMARE

Selon les indicateurs du CIMOTFF, les coupes ont permis de maintenir sur pied une surface terrière de 3,0 m²·ha⁻¹ dans la classe de DHP de 10-22 cm, une valeur relativement grande (figure 2f). La surface terrière résiduelle des tiges de la classe de DHP de 24-44 cm était grande, elle aussi : 6,5 m²·ha⁻¹ dans les ESI et 8,4 m²·ha⁻¹ dans la CJPG, ce qui était comparable aux valeurs les plus grandes des indicateurs du CIMOTFF (figure 2f). Après 5 ans, les structures diamétrales (figure 2g) ressemblaient à celles décrites immédiatement après la coupe (figure 2f), même si un transfert de surface terrière s'est effectué de la classe de DHP de 24-44 cm vers celle de 46-90 cm (figure 2g). Après 10 ans, la surface terrière dans la classe de DHP de 30-38 cm

a augmenté pour le traitement CJPG (figure 2d), et celle dans la classe de 46-90 cm a augmenté dans tous les traitements de coupe (figures 2f et 2h).

Les AAN prédits par SaMARE pour le traitement CJPG concordaient assez bien avec ceux observés, tant pour les deux périodes quinquennales que pour la période décennale (figure 7). Pour le traitement ESIO, les différences entre les valeurs prédites et observées étaient grandes pour la période 0-5 ans, mais petites pour la période 5-10 ans. Globalement, les différences étaient acceptables et non biaisées, puisque les valeurs étaient réparties de part et d'autre de la ligne d'égalité. Pour le traitement ESIN, les différences étaient plus grandes entre les deux périodes quinquennales, en particulier dans l'unité expérimentale C2 (tableau 2), dans laquelle l'AAN a été pratiquement nul pour la période 5-10 ans à cause de pertes importantes par mortalité, surtout chez les érables à sucre de priorité de récolte M.

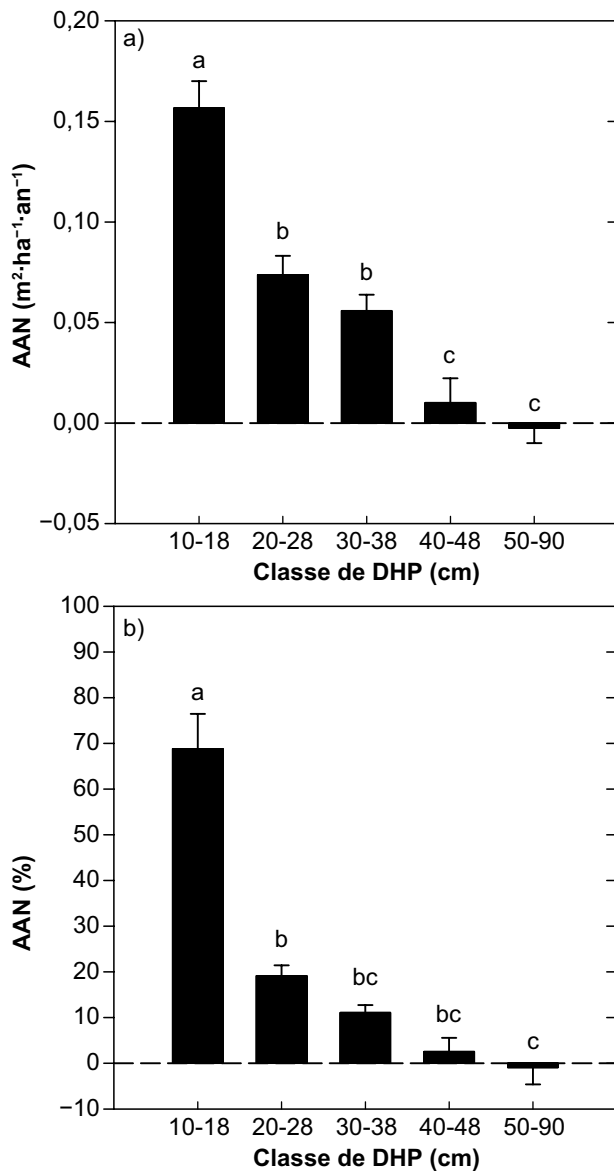


Figure 4. Accroissement annuel net (AAN) décennal en surface terrière selon la classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) dans les unités expérimentales traitées seulement (CJPG, ESIN et ESIO) : a) en valeur absolue ($m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$); b) en proportion (%) de la surface terrière de chaque classe de DHP immédiatement après la coupe. Des lettres différentes au-dessus des colonnes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre les moyennes. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type. La contribution du recrutement à l'accroissement net de la classe des 10-18 cm n'est pas représentée. Ces surfaces terrières ont été calculées à partir des DHP mesurés au ruban diamétrique.

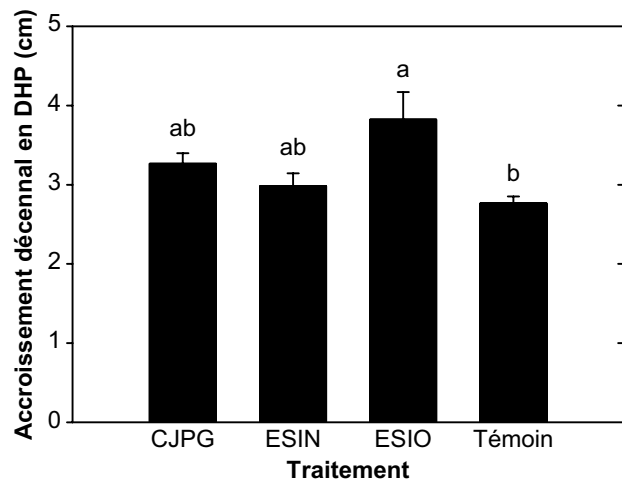


Figure 5. Accroissement décennal en diamètre à hauteur de poitrine (DHP, en cm) des bouleaux jaunes d'avenir éclaircis selon le traitement. Des lettres différentes au-dessus des colonnes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre les moyennes. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type. CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

La projection avec SaMARE de la surface terrière marchande sur une période de 40 ans suggère que la CJPG permettra de reconstituer une surface terrière suffisante ($24 m^2 \cdot ha^{-1}$) pour qu'une prochaine récolte soit envisagée à 15 ans (figure 8a). Cet intervalle s'allonge à 20 ans les deux ESI, et les courbes des trois traitements tendent à se rejoindre avec le temps (figure 8a). Le volume des billes de grande valeur évolue selon des tendances différentes de la surface terrière : seule la CJPG permettrait de reconstituer le volume initial de billes de grande valeur ($25 m^3 \cdot ha^{-1}$) et de prévoir une prochaine récolte après 15 ans (figure 8b). Pour ce traitement, le volume des billes de grande valeur plafonne à près de $27 m^3 \cdot ha^{-1}$ après 20 à 40 ans. Dans les unités expérimentales des deux ESI, la croissance projetée est nettement plus faible et plafonne vers $20 m^3 \cdot ha^{-1}$ en fin de période de simulation.

Pour les caractéristiques moyennes des peuplements traités par ESI et la CJPG (figure 2f), une des régressions linéaires du CIMOTFF prédit que la surface terrière résiduelle des arbres de la classe de DHP de 10-22 cm ($3,0 m^2 \cdot ha^{-1}$) serait suffisante pour qu'une surface terrière d'environ 6 à $7 m^2 \cdot ha^{-1}$ se reconstitue dans la classe de DHP de 24-44 cm au cours d'une rotation de 20 ans. Cette cible sera probablement atteinte, étant donné qu'elle l'est déjà presque à 10 ans (figure 2h).

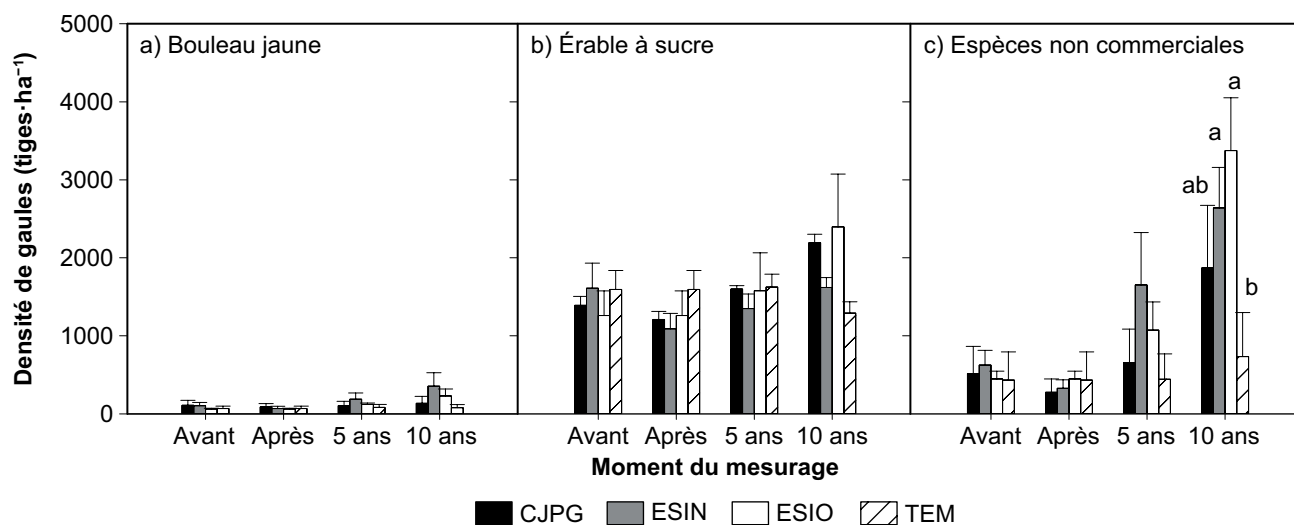


Figure 6. Densité moyenne de gaules (tiges·ha⁻¹) a) de bouleau jaune, b) d'érable à sucre et c) des espèces non commerciales, selon le traitement et le moment du mesurage. Des lettres différentes au-dessus des colonnes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre les moyennes. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type. CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention; Avant = avant le scarifiage dans les traitements CJPG et ESIN; Après = après le scarifiage.

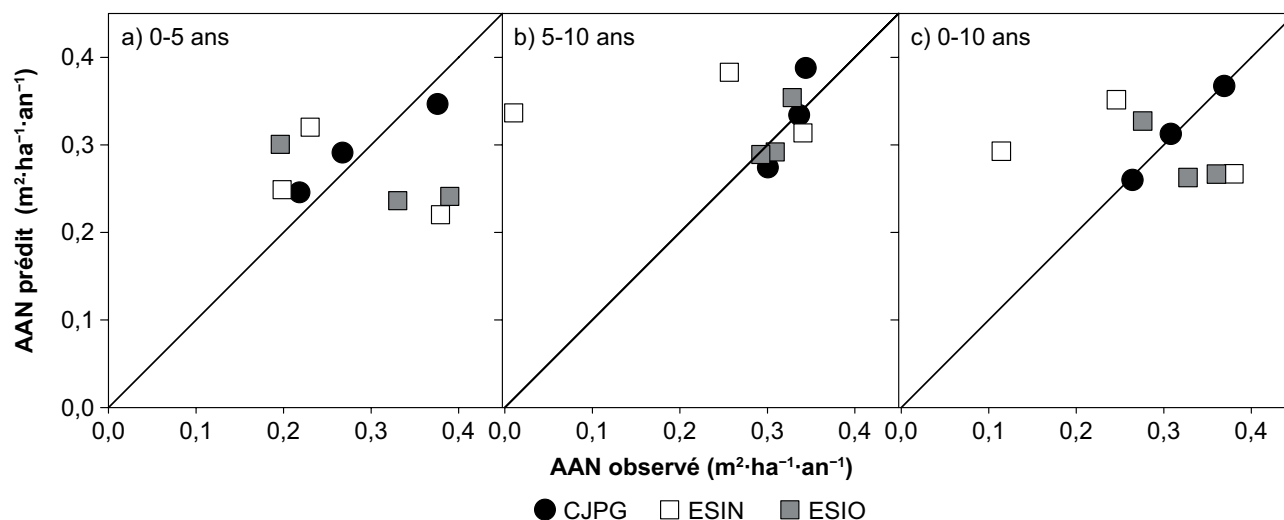


Figure 7. Accroissement annuel périodique net en surface terrière (AAN, m²·ha⁻¹·an⁻¹) observé et prédit par le modèle de simulation SaMARE pour les périodes a) 0-5 ans, b) 5-10 ans et c) 0-10 ans. La ligne diagonale représente une relation selon laquelle l'AAN prédit est le même que l'AAN observé. CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle.

Une autre régression du CIMOTFF prédit que les surfaces terrières résiduelles des arbres de la classe de DHP de 24-44 cm dans les traitements ESI et CJPG (6,5 et 8,4 m²·ha⁻¹, respectivement) devraient permettre au volume de bois d'œuvre d'essences feuillues de grande valeur d'atteindre environ 27 et 33 m³·ha⁻¹, respectivement, au cours d'une rotation de 20 ans (tableau 7). Ces volumes prédits sont égaux ou supérieurs aux valeurs avant la coupe (de 21,7 à 25,4 m³·ha⁻¹ selon le traitement, tableau 4), et

supérieurs à ceux prédits par SaMARE à 20 ans (de 18,5 à 27,2 m³·ha⁻¹, tableau 7, figure 8b). Toutefois, ces prédictions pourraient ne pas être atteintes à 20 ans, compte tenu de la faible croissance observée au cours des 10 premières années. En effet, l'accroissement décennal du volume de bois d'œuvre de grande valeur n'a été que d'environ 1,5 m³·ha⁻¹ dans les unités traitées par ESI ou CJPG (tableau 4), alors qu'il aurait fallu une valeur de 5 à 10 m³·ha⁻¹ pour se rapprocher des prédictions.

Tableau 7. Volume des billes des grande valeur prédit à 20 ans selon le traitement et le modèle de prédiction.

Traitement*	Volume (m ³ .ha ⁻¹)		
	Projection de l'accroissement observé de 0 à 10 ans (tableau 5)	Régression du CIMOTFF	SaMARE (figure 8b)
CJPG	21,1	33,1	27,2
ESIN	18,9	26,6	21,9
ESIO	18,8	26,6	18,5
Moyenne	19,6	28,8	22,3

* CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle.

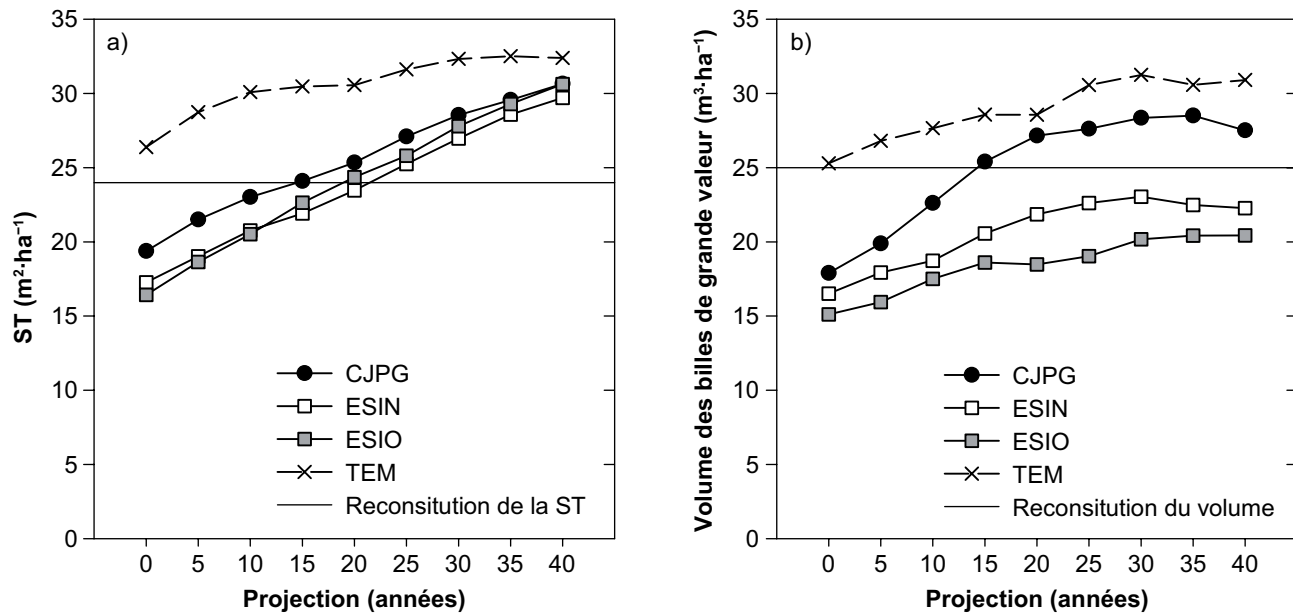


Figure 8. Projections sur 40 ans du modèle de simulation SaMARE a) de la surface terrière marchande (ST, en m².ha⁻¹) et b) du volume des billes de grande valeur (en m³.ha⁻¹) pour les différents traitements. La surface terrière ou le volume à reconstituer est représenté par une ligne horizontale. CJPG = coupe de jardinage par pieds d'arbres et groupes d'arbres; ESIN = éclaircie sélective individuelle selon la norme; ESIO = éclaircie sélective individuelle opérationnelle; TEM = témoin sans intervention.

Chapitre 3

Discussion

3.1 Application des traitements selon les critères du MAF

La plupart des critères du MAF ont été respectés : composition en essences du peuplement, structure diamétrale, composition initiale de la surface terrière en CF et en CFC, et surface terrière prélevée. Toutefois, la surface terrière résiduelle du CF n'excédait pas $14 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans 5 des 6 UE traitées par l'ESI, même si elle se situait généralement près de ce seuil. Ce résultat s'explique par le fait que certains arbres non martelés ont été coupés, principalement des érables à sucre et des bouleaux jaunes.

L'ESI n'est plus pratiquée dans le contexte actuel, notamment depuis que le *Guide sylvicole du Québec* (MRN 2013) a remplacé le MAF et que l'appellation des traitements sylvicoles et de leurs modalités a été normalisée. Cependant, l'ESI pourrait se décrire comme une variante de la coupe progressive irrégulière (CPI), à couvert permanent (CPI-CP, Raymond *et al.* 2013) et avec un dégagement des bouleaux jaunes d'avenir. En effet, ce traitement permet de dégager des arbres d'avenir, de récupérer des arbres dont la mortalité est anticipée et de créer des trouées favorisant la régénération du bouleau jaune. Contrairement aux modalités habituelles d'une CJPG (Guillemette *et al.* 2013a), l'ESI visait à dégager spécifiquement des arbres d'avenir, soit les bouleaux jaunes dégagés après un martelage positif, et ne visait pas à équilibrer la structure du peuplement. Ces différences entre l'ESI et la CJPG sont toutefois relativement minces, surtout si l'on compare l'ESI avec une CJPG dans laquelle la surface terrière résiduelle serait réduite jusqu'à $16 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.

3.2 Comparaison entre les traitements

3.2.1 Accroissements quinquennaux et décennaux

Les AAN décennaux mesurés dans les UE traitées (de $0,25$ à $0,31 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, tableau 5) sont semblables à ceux mesurés dans d'autres érablières ($0,28 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et bétulaies jaunes ($0,29 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) situées dans les régions écologiques 4b et 4c (Guillemette *et al.* 2013b). Considérant que l'AAN décennal du témoin de la

présente étude ($0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) était beaucoup plus faible que celui mesuré dans Guillemette *et al.* (2013b) (soit $0,22 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$), des différences significatives entre le témoin et les autres traitements auraient pu être décelées, mais cela n'a pas été le cas. Cette absence de différences peut s'expliquer, du moins en partie, par le faible nombre de répétitions ($n = 3$), qui tend à augmenter la variation autour des moyennes. D'ailleurs, les probabilités (valeurs de p) associées aux effets des traitements pour l'AAN décennal et ses composantes étaient très près du seuil théorique de 5 % (tableau 6), tout comme celle de la comparaison entre l'ESIO et le témoin ($p = 0,053$) et entre la CJPG et le témoin ($p = 0,058$).

Néanmoins, les analyses d'AAN de cette étude ont révélé deux résultats surprenants pour les unités traitées. Premièrement, plus de la moitié de l'AAN provient des arbres de la classe de DHP de 10-18 cm, et presque tout l'AAN provient des arbres de moins de 40 cm de DHP (figure 4). Ce résultat met en évidence, d'une part, l'importance de protéger les arbres de la classe de DHP de 10-18 cm lors des opérations de récolte, et d'autre part, que la récolte des arbres qui ont atteint leur diamètre de maturité (40 cm et plus) a peu d'effets négatifs sur la production de matière ligneuse. Nous n'avons cependant pas évalué les conséquences d'une telle récolte sur d'autres objectifs de l'aménagement écosystémique, notamment l'abondance des gros arbres et le volume de débris ligneux ou de chicots pour la faune. Deuxièmement, nous n'avons pas décelé de différences significatives dans l'accroissement net ou brut en fonction de la surface terrière résiduelle des peuplements traités (figure 3). Ceci est contraire à ce qui avait été publié par Leak *et al.* (1969) et repris par Guillemette *et al.* (2013a, figure 23.4) dans le *Guide sylvicole du Québec*. Toutefois, notre étude couvrait une moins grande gamme de surfaces terrières que celle de Leak *et al.* (1969). Dans l'intervalle d'environ 15 à $20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, la surface terrière résiduelle ne semble pas être une variable importante pour expliquer des différences de rendement en surface terrière pour la première décennie suivant la coupe.

En ce qui a trait au volume, les deux traitements d'ESI n'ont pas permis de récolter significativement

plus de bois d'œuvre d'essences feuillues de grande valeur que la CJPG, même si en moyenne il y avait $1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de différence. Par conséquent, il n'est pas surprenant de constater que la production subséquente de ce bois, mesurée par l'accroissement décennal, n'ait pas été affectée. Sur le site d'étude, l'érable à sucre se trouve à sa limite nordique et est de qualité bien moindre que dans d'autres érablières plus méridionales au Québec (Guillemette et Bédard, soumis). L'absence de différences significatives observées entre les traitements pourrait s'expliquer par la faible proportion du VMB que représentent les billes de grande valeur dans cette étude. Par ailleurs, cette proportion est probablement surestimée en raison de la coloration de cœur de l'érable à sucre, qui est plus prononcée dans les érablières nordiques de cette région (Havreljuk *et al.* 2013). De plus, le modèle utilisé pour estimer le volume en billes de grande valeur (Havreljuk *et al.* 2015) ne tient pas compte de la hauteur des arbres. Or, ceux du peuplement à l'étude sont certainement moins hauts que la moyenne de l'échantillon utilisé par Havreljuk *et al.* (2015). Il faut donc un bon marché de bois de faible valeur afin de rentabiliser les coûts de récolte, ce qui est difficilement réalisable pour un peuplement situé à plus de 100 km au nord de Mont-Laurier.

3.2.2 Bouleaux jaunes d'avenir

L'ESI visait notamment à favoriser la survie et la croissance des bouleaux jaunes d'avenir. Les résultats démontrent qu'après 10 ans, leur taux de survie est très élevé ($> 93 \%$) dans tous les traitements, y compris le témoin. Nous n'avons pas trouvé de différences entre la CJPG et les deux traitements d'ESI pour la croissance en DHP de ces bouleaux jaunes, bien que ceux dégagés dans l'ESIO aient obtenu un léger gain d'accroissement (1 cm) par rapport à ceux qui n'avaient pas été dégagés dans le traitement témoin (figure 5). Ce gain est négligeable considérant la période de suivi, le fait que ce gain n'ait pas aussi été observé dans l'ESIN et la densité relativement faible de ces bouleaux d'avenir ($30 \pm 4 \text{ arbres} \cdot \text{ha}^{-1}$). Comme le DHP moyen des bouleaux sélectionnés était de 37,8 cm, une grande part de ces arbres étaient possiblement trop gros pour avoir un bon gain d'accroissement après la coupe (Guillemette 2016). En effet, il est connu que ce sont principalement les arbres des petits et moyens DHP (classes de 10-18 et 20-28 cm) qui réagissent le plus à l'ouverture du couvert (p. ex., Majcen *et al.* 2005). Une autre étude réalisée dans ce dispositif a déjà démontré que les accroissements quinquennaux du bouleau jaune et de l'érable à sucre diminuaient en fonction du DHP initial (Gauthier et Guillemette 2018).

3.2.3 Régénération

La régénération à long terme, mesurée par la densité de gaules d'érable à sucre, est abondante dans tous les traitements avec récolte, bien que la saturation en bases des sols soit considérée comme déficiente pour cette espèce selon les seuils proposés par Ouimet *et al.* (2013) (tableau 1 et figure 6). Contrairement à d'autres secteurs sur des sols carencés en cations basiques, la régénération en érable à sucre n'est pas déficiente (figure 1d) et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.) est absent, peut-être parce que le dispositif se trouve au nord de l'aire de répartition du hêtre. Après 10 ans, il y a cependant plus de compétition de la part des espèces non commerciales dans l'ESIN et l'ESIO que dans le témoin. Le noisetier et la viorne, et dans une moindre mesure, d'autres espèces intolérantes à l'ombre comme le cerisier de Pennsylvanie, le sorbier d'Amérique et le sureau du Canada ont su profiter de l'augmentation de la lumière. Il sera intéressant de déterminer si l'augmentation des gaules de bouleaux jaunes décelée dans tous les traitements persistera dans le temps, et de voir si, dans 5 ans, la régénération en bouleau jaune qui s'est établie après la coupe aura été recrutée dans les classes des gaules. Des données plus détaillées sur la régénération installée dans des ouvertures par groupes d'arbres seront analysées lorsque le dispositif aura atteint 15 ans et que cette régénération devrait s'être affranchie du broutement par les cervidés.

3.3 Analyse selon les indicateurs du CIMOTFF et simulations de croissance avec SaMARE

Une des régressions publiées dans le rapport du CIMOTFF sert à évaluer la reconstitution du volume net de bois d'œuvre d'essences feuillues de grande valeur au cours d'une rotation, selon la surface terrière résiduelle dans la classe de DHP de 24-44 cm. Avec des surfaces terrières résiduelles de $6,5$ à $8,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour cette classe dans les peuplements traités, on s'attendrait à retrouver environ de 27 à $33 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de bois d'œuvre de grande valeur dans une vingtaine d'années (tableau 7). Cela implique un accroissement d'environ $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, ce qui est plus du triple de ce qui a été observé au cours de la première période décennale ($0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, tableau 4). Cette faible croissance en volume peut être attribuable à la faible fertilité du site pour les feuillus. De plus, l'emplacement du site, à la limite nordique des deux espèces, ne permet peut-être pas d'atteindre les rendements escomptés. À ce rythme, on peut s'attendre à obtenir un volume de $18,8$ à $21,1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de bois d'œuvre de grande valeur à 20 ans (tableau 7). Par

conséquent, la régression du CIMOTFF surestime ce volume à 20 ans de $9,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (soit 47 %), et ce, tant pour la CJPG que pour l'ESI. Pourtant, cette régression avait été étalonnée à partir de résultats de croissance simulée avec SaMARE, lequel prédit des volumes qui seraient surestimés de seulement $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, ou de 14 % (tableau 7). Cela dit, l'utilisation que nous avons faite de SaMARE dans la présente étude implique l'utilisation du modèle de Havreljuk *et al.* (2015) pour estimer les volumes de bois d'œuvre de grande valeur selon le DHP, l'essence et la classe de vigueur des arbres. À l'opposé, la régression du CIMOTFF a été étalonnée en utilisant la croissance projetée par SaMARE combinée avec une matrice de répartition par produits basée sur la priorité de récolte et une classe de bois d'œuvre potentiel (matrice MSCR-OP de l'outil MÉRIS¹ du Bureau de mise en marché des bois). En reprenant nos estimations de bois d'œuvre avec cette matrice et les résultats de simulation de SaMARE, nous avons constaté que cette dernière était en grande partie responsable du biais (données non publiées). D'ailleurs, la première recommandation du CIMOTFF ciblait justement le risque de biais associé à cette matrice MSCR-OP et incitait à revoir son utilisation (Saucier *et al.* 2014).

Même si les volumes anticipés sont surestimés par la régression du rapport du CIMOTFF, les volumes sur pied sont encore non négligeables et ne devraient pas empêcher de réaliser une prochaine coupe partielle vers 20 à 30 ans, soit lorsque les peuplements auraient dépassé une surface terrière de $24 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et un volume de billes de grande

valeur de 20 à $25 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (figure 8). Toutefois, cette prochaine coupe partielle pourrait générer relativement moins de bois de grande valeur. La progression des traitements est semblable à celle simulée pour la CJPG dans d'autres érablières et bétulaies jaunes situées dans les régions écologiques 4b et 4c (Gauthier *et al.* 2016). Toutefois, l'évolution du volume des billes de grande valeur indique que seule la CJPG permettra de reconstituer le volume initial ($25 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) en cours de rotation, et ce, après 15 ans (figure 8b). Ce résultat découle principalement d'une surface terrière résiduelle plus grande après la CJPG qu'après l'ESI, particulièrement parmi les arbres des classes de DHP de 24-44 cm (figure 2f-h), et plus précisément, celle de 30-38 cm (figure 2b-d).

Une autre régression du rapport du CIMOTFF sert à évaluer la reconstitution à long terme des arbres des classes de DHP de 24-44 cm à partir des arbres résiduels de la classe de DHP de 10-22 cm. La surface terrière relativement grande ($3,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) des arbres de la classe de 10-22 cm dans les peuplements résiduels permet d'anticiper une bonne reconstitution à long terme de la classe de 24-44 cm. Le fait que ces arbres de DHP de 10-22 cm aient contribué grandement à l'accroissement net des peuplements (figure 4) est un bon signe. La surface terrière des arbres de DHP de 24-44 cm n'a que légèrement diminué en 10 ans, mais cela a aussi été le cas dans les peuplements témoins (figure 2f, h).

¹ MÉRIS : modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles
[<https://bmmmb.gouv.qc.ca/analyses-economiques/outils-d-analyse/>]

Conclusion

Dans ce dispositif, l'ESI a été appliquée conformément à la plupart des critères du *Manuel d'aménagement forestier*. Cette coupe a permis de récolter un volume marchand brut de $71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (dont $6,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ net de bois d'œuvre de grande valeur), soit légèrement plus que la CJPG ($60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, dont $5,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ net de bois d'œuvre de grande valeur). Bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative, ce gain dans l'ESI aurait réduit les surfaces terrières résiduelles de l'ensemble des arbres marchands et de ceux dont le DHP était

de 24 à 44 cm parmi ceux compris dans le capital forestier en croissance. Après 10 années de croissance, les accroissements nets en surface terrière (de $0,25$ à $0,31 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et en volume de billes de grande valeur (de $0,11$ à $0,19 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) étaient semblables dans ces traitements. Toutefois, la projection à long terme de ce volume avec le modèle SaMARE indique qu'un écart significatif et positif pourrait être obtenu avec la CJPG comparativement aux ESI. Ce gain devrait permettre d'avoir une rotation plus près de 15 ans que de 20 ans.

Références bibliographiques

- Boulet, B., 2005. *Défauts externes et indices de la carie des arbres*. Les Publications du Québec, Sainte-Foy, Québec. 291 p.
- Erdmann, G.G., 1990. *Betula alleghaniensis Britton – Yellow Birch*. Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala (éds.). *Silvics of North America: Volume 2. Hardwoods*. USDA, For. Serv., Washington, D.C. (États-Unis). Agric. Handb. 654. p. 133-147. [<https://www.forestasyst.org/hardwoods/alleghaniensis.htm>]
- Erdmann, G.G. et R.R. Oberg, 1973. *Fifteen-year results from six cutting methods in second-growth northern hardwoods*. USDA, For. Serv., North Cent. For. Exp. Stn., St. Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-100. 15 p. [<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/10621>]
- Fortin, M. et L. Langevin, 2010. *ARTÉMIS-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 68 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf>]
- 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 n° 155. 62 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire155.pdf>]
- Gauthier M.-M., F. Guillemette et S. Bédard, 2015. *On the relationship between saplings and ingrowth in northern hardwood stands*. For. Ecol. Manage. 358: 261–271. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.020>]
- Gauthier, M.-M. et F. Guillemette, 2018. *Bark type reflects growth potential of yellow birch and sugar maple at the northern limit of their range*. Plant Ecol. 219(4): 381-390. [<https://doi.org/10.1007/s11258-018-0802-x>]
- Gauthier, M.-M., F. Guillemette, H. Power et F. Havreljuk, 2016. *Capacité des modèles SaMARE et Artémis à simuler l'évolution des peuplements après une coupe de jardinage pratiquée dans un contexte opérationnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 144. 18 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gauthier-Martin-Michel/Note144.pdf>]
- Gosselin, J., 2002. *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 4b – Coteaux du réservoir Cabonga et 4c – Collines du Moyen-Saint-Maurice*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations. 173 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-4bc.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 n° 145. 14 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Guillemette-Francois/Note145.pdf>]
- Guillemette, F. et S. Bédard, soumis. *Potential for sugar maple to provide high-quality sawlog trees at the northern edge of its range*. Soumis à Forest Science.
- Guillemette, F. et M.-C. Lambert, 2009. *Relative effects of dendrometers on the estimation of diameter at breast height, stand basal area and stand volume in uneven-aged northern hardwoods*. For. Chron. 85(3): 446-452.
- Guillemette, F., S. Bédard et M. Fortin, 2007. *Installation d'un dispositif de suivi des effets de l'éclaircie sélective individuelle dans des érablières à bouleau jaune près du réservoir Mitchinamecus*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 496. 60 p.

- Guillemette, F., S. Bédard, D. Pin et D. Dumais, 2013a. *Chapitre 23 – Les coupes de jardinage avec gestion par arbres*. Dans : Ministère des Ressources naturelles, *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. p. 566-603.
- Guillemette, F., M.-M. Gauthier, M.-C. Lambert et S. Bédard, 2013b. *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. Note de recherche forestière n° 168. 34 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Guillemette-Francois/Memoire168.pdf>]
- Havreljuk, F., A. Achim et D. Pothier, 2013. *Regional variation in the proportion of red heartwood in sugar maple and yellow birch*. *Can. J. For. Res.* 43(3): 278–287.
- 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*. 15-17 septembre 2015. Québec, QC. p. 107-114.
- Leak, W.B., D.S. Solomon et S.M. Filip, 1969. *A silvicultural guide for northern hardwoods in the northeast*. USDA, For. Serv., Northeast. For. Exp. Stn., Upper Darby, PA (États-Unis). Res. Pap. NE-143. 34 p. [<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/23736>]
- Leak, W.B., D.S. Solomon et P.S. DeBald, 1987. *Silvicultural guide for northern hardwood types in the Northeast (revised)*. USDA, For. Serv., Northeast. For. Exp. Stn., Broomall, PA (États-Unis). Res. Pap. NE-603. 36 p. [<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/4421>]
- 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, Service de la recherche appliquée. Mémoire de recherche forestière n° 96. 96 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/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 n° 148. 39 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Bedard-Steve/Memoire148.pdf>]
- [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. 744 p.
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2005a. *Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits – Exercice 2005-2006*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Forêt Québec, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles. 109 p. [<http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs21630>]
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2005b. *Méthodes d'échantillonnage pour les inventaires d'intervention (inventaire avant traitement) et pour les suivis des interventions forestières (après martelage, après coupe et années antérieures) – Exercice 2005-2006*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'assistance technique, Division des traitements sylvicoles. 305 p. [<http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs21638>]
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2003. *Manuel d'aménagement forestier*. 4^e édition. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des programmes forestiers. 245 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/manuel.pdf>]
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2004. *Classification des tiges d'essences feuillues – Normes techniques*. 2^e édition. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers. 73 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/classif-tiges-essence-feuillues-6.pdf>]

- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2013. *Mise à jour des seuils de fertilité des sols pour diagnostiquer les carences en calcium, potassium et phosphore chez l'érable à sucre*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 137. 17 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Note137.pdf>]
- Perron, J.Y., 2003. *Tarif de cubage général : volume marchand brut*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de l'inventaire forestier. 55 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/tarif-de-cubage-64.pdf>]
- Petro, F.J. et W.W. Calvert, 1976. *La classification des billes de bois franc destinées au sciage*. Gouvernement du Canada, ministère des Pêches et de l'Environnement du Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, Ont. Rapport technique de foresterie n° 6F. 69 p.
- Raymond, P., C. Larouche, S. Bédard et S. Tremblay, 2013. *Chapitre 20 – La coupe progressive irrégulière*. Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.), *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. p. 456-515.
- Régnière, J., R. Saint-Amant et A. Bédard, 2014. *BioSIM 10 – Guide de l'utilisateur*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Rapport d'information LAU-X-137F, 70 p. [<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/34817.pdf>]
- Saucier, J.-P., F. Guillemette, P. Gauthier, J. Gravel, F. Labbé, S. Meunier et N. Vachon, 2014. *Rapport du Comité sur l'impact des modalités opérationnelles des traitements en forêt feuillue (CIMOTFF)*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport technique. 98 p. et annexes. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/rapport-CIMOTFF.pdf>]
- Westfall P.H., R.D. Tobias et R.D. Wolfinger, 2011. *Multiple comparisons and multiple tests using SAS*. 2^e édition. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis). 625 p.



Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs a comme mandat de s'assurer de la gestion durable des forêts publiques québécoises. À cette fin, il conçoit et expérimente des traitements sylvicoles qui s'appuient sur l'autécologie des essences et qui s'inspirent de la dynamique naturelle des forêts de feuillus. Ces travaux servent notamment à définir les hypothèses de rendement pour déterminer la possibilité forestière ainsi que les modalités d'application des traitements sylvicoles. Selon ces objectifs, la Direction de la recherche forestière a un projet de mesure des effets réels de l'éclaircie sélective individuelle et de la coupe de jardinage pratiquées dans des peuplements de feuillus nordiques. Ce mémoire de recherche forestière présente les résultats d'une analyse de l'accroissement après 10 ans dans les peuplements d'un dispositif de mesure des effets réels de ces traitements.

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 