



Éclaircie commerciale de pinèdes à pin rouge de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : résultats 25 ans après l'éclaircie

par Christian Godbout

Mémoire de recherche forestière n° 187
Direction de la recherche forestière

Éclaircie commerciale de pinèdes à pin rouge de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : résultats 25 ans après l'éclaircie

par Christian Godbout ing.f., M. Sc., Ph. D.

Auteur de correspondance : patricia.raymond@mffp.gouv.qc.ca

Mandat de la DRF

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

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

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

Pour obtenir des renseignements complémentaires, veuillez vous adresser 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 :

Godbout, C. 2021. *Éclaircie commerciale de pinèdes à pin rouge de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : résultats 25 ans après l'éclaircie*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 187. 52 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 (PDF) : 978-2-550-89402-5
G.F.D.C. 242--015 (714)
L.C. SD 396.5

Notes biographiques



Christian Godbout est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval en génie forestier (B. Sc., 1980), en écologie végétale (M. Sc., 1984) et en sciences forestières (Ph. D., 1991). De 1986 à 1989, il est chargé de projet au Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval et s'intéresse à la biologie et à

l'écophysiologie des symbioses ectomycorhiziennes. De 1990 à 1992, il est chargé de recherche à l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal et s'intéresse également aux symbioses ectomycorhiziennes. En 1992, il entre à la Direction de la recherche forestière en tant que chercheur en écologie forestière afin d'étudier la variabilité des sols forestiers ainsi que la composition et la dynamique des forêts anciennes. De 1999 jusqu'à sa retraite en 2021, il travaille au Service de la sylviculture et du rendement des forêts. Ses recherches portent sur la sylviculture du bouleau à papier, du pin blanc et du pin rouge.

Résumé

Très peu d'études ont été publiées sur le rendement de l'éclaircie commerciale de pinèdes naturelles à pin rouge (*Pinus resinosa* Aiton) âgées de plus de 50 ans, et aucune n'a été publiée pour celles du Québec. Afin de pallier cette lacune, 3 intensités d'éclaircie tardive ont été pratiquées dans des pinèdes à pin rouge et une pinède à pin gris (*Pinus banksiana* Lambert) surannée avec pins rouges âgées de 80 ans en Outaouais. Les éclaircies ont laissé des surfaces terrières résiduelles moyennes de 23,5 m²·ha⁻¹ (traitement EC23; 2 parcelles de 1,0 ha) et de 18,5 m²·ha⁻¹ (traitement EC18; 2 parcelles de 1,0 ha) dans les pinèdes à pin rouge, et de 13,1 m²·ha⁻¹ (traitement EC13; 1 parcelle de 0,5 ha) dans la pinède à pin gris, qui est devenue une pinède à pin rouge à la suite de l'éclaircie. L'étude ne comporte pas de parcelles témoins non éclaircies. Les résultats 25 ans après l'éclaircie sont présentés ici.

L'accroissement en diamètre du pin rouge a été d'autant plus grand que la surface terrière résiduelle associée aux traitements a été faible. Les valeurs maximales ont été atteintes dès la classe de DHP de 19 cm pour l'EC13 et l'EC18 (moyennes respectives de 13 cm et de 10 cm en 25 ans), et à la classe de DHP de 27 cm pour l'EC23 (moyenne de 8 cm). Ensuite, il a d'abord peu changé avec l'augmentation du DHP, puis il a diminué lentement jusqu'à la classe de DHP de 39 cm.

La production nette de l'ensemble des espèces a été inversement proportionnelle à la surface terrière résiduelle après l'éclaircie : en moyenne 12,1 m²·ha⁻¹ pour l'EC23, 13,9 m²·ha⁻¹ pour l'EC18 et 16,3 m²·ha⁻¹ pour l'EC13 (ou respectivement 0,48, 0,56 et 0,65 m²·ha⁻¹·an⁻¹). Cela représente respectivement 52 %, 76 % et 125 % de la surface terrière après l'éclaircie de chacun des traitements.

Pour une même proportion de la surface terrière résiduelle en pins rouges de dimension marchande (DHP ≥ 9,1 cm), les estimations de la production nette en pin rouge de dimension sciage (DHP ≥ 24,1 cm) montrent que la production nette serait à peine plus élevée pour l'EC18 que pour l'EC23 (0,49 m²·ha⁻¹·an⁻¹ vs 0,47 m²·ha⁻¹·an⁻¹, en supposant que la proportion de pins rouges de dimension marchande est de 70 %, dont 70 % de dimension sciage). Cette faible différence s'estomperait lorsque la proportion de pins rouges de dimension sciage augmente. Pour les pins de dimension poteau (DHP ≥ 32,1 cm), la production serait légèrement plus grande pour l'EC23 que pour l'EC18.

Les meilleurs rendements par m² de surface terrière après l'éclaircie ont été observés chez les pins rouges de la classe de DHP de 19 cm pour l'EC18 et l'EC23 (respectivement 1,3 et 0,8 m² produit en 25 ans par m² de surface terrière après l'éclaircie). Pour la classe de DHP de 35 cm, ces taux de rendement ont diminué à 0,5 m² par m² de surface terrière après l'éclaircie pour les 2 traitements.

Afin de maximiser le rendement après l'éclaircie des pinèdes à pin rouge de plus de 80 ans, il semble avisé de ne pas avoir l'objectif de produire des pins rouges de grosses dimensions, car la production du pin rouge par m² de surface terrière diminue avec la grosseur des tiges. Plutôt, lors d'une éclaircie tardive dans de tels peuplements, il semble justifié de pratiquer une éclaircie par le haut et de récolter surtout les pins rouges de dimension poteau, tout en laissant sur pied un maximum de pins rouges ayant des DHP de 20 à 30 cm et présentant peu de défauts.

Mots-clés : accroissement, éclaircie tardive, mortalité, pin rouge, *Pinus resinosa*, recrutement, rendement

Abstract

Very few studies have been published on the yield of natural red pine (*Pinus resinosa* Aiton) forests that were over 50 years of age at commercial thinning, and none have been published about those in Quebec. To remedy this shortcoming, three intensities of late thinning were practiced in 80-year-old red pine forests and in an overmature jack pine (*Pinus banksiana* Lambert) forest in the Outaouais region. On average, thinning left residual basal areas of $23.5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (EC₂₃ treatment; 2 plots of 1.0 ha) and $18.5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (EC₁₈ treatment; 2 plots of 1.0 ha) in the red pine forests, and $13.1 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (EC₁₃ treatment; 1 plot of 0.5 ha) in the jack pine forest, which became a red pine forest as a result of this treatment. The study does not include unthinned control plots. Results 25 years after the thinning are presented here.

The smaller was the residual basal area associated with the treatment, the greater was the increase in red pine diameter. The maximum values were reached in the 19 cm DBH class for both EC₁₃ and EC₁₈ (average 25-year diameter increases of 13 cm and 10 cm, respectively), and in the 27 cm DBH class for EC₂₃ (average of 8 cm). Thereafter, diameter increase changed little for larger DBH classes, then slowly declined until the 39 cm DBH class.

The net production of all species was inversely proportional to the residual basal area after thinning: on average, $12.1 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ for EC₂₃, $13.9 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ for EC₁₈ and $16.3 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ for EC₁₃ (or 0.48, 0.56 and

$0.65 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, respectively). This represents 52%, 76% and 125% of the basal area after thinning for each treatment, respectively.

For a given proportion of residual basal area composed of merchantable-sized red pines (DBH ≥ 9.1 cm), estimated net production for sawn-sized red pines (DBH ≥ 24.1 cm) would be slightly greater for EC₁₈ than for EC₂₃ ($0.49 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ vs $0.47 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, assuming that the proportion of merchantable-sized red pines is 70%, 70% of which are sawn-sized). This small difference would disappear if the proportion of sawn-sized red pines increased. For pole-sized pines (DBH ≥ 32.1 cm), production would be slightly greater for EC₂₃ than for EC₁₈.

The best yields per m^2 of basal area after thinning were observed in red pines of the 19 cm DBH class for EC₁₈ and EC₂₃ (25-year yields of 1.3 and 0.8 m^2 per m^2 of basal area after thinning, respectively). For the 35 cm DBH class, these yield rates decreased to 0.5 m^2 per m^2 of basal area after thinning for both treatments.

In order to maximize the post-thinning yield of red pine forests over 80 years of age, it seems advisable not to aim to produce large red pines, since red pine yield per m^2 of basal area decreases with the size of the stems. Instead, during a late thinning in such stands, it seems justified to practice a thinning from above and to harvest mainly pole-sized red pines and to leave standing a maximum of red pines with DBH values of 20 to 30 cm and with few defects.

Keywords: growth, late thinning, mortality, *Pinus resinosa*, recruitment, red pine, yield

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	x
Liste des annexes	xi
Liste des abréviations et des termes utilisés dans ce document	xii
Liste des espèces mentionnées dans ce document	xiii
Remerciements	xv
Introduction	1
Chapitre 1 – Matériel et méthodes	3
1.1 Site d'étude	3
1.2 Dispositif expérimental.....	3
1.3 Mesurage 25 ans après l'éclaircie	4
1.3.1 Tiges de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm)	4
1.3.2 Gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm).....	4
1.4 Calculs.....	4
1.4.1 Relation hauteur-DHP et volume marchand brut du pin rouge.....	4
1.4.2 Valeurs minimales de DHP des classes de qualité sciage et poteau	4
1.4.3 Production	5
Chapitre 2 – Résultats	7
2.1 Caractéristiques dendrométriques des parcelles.....	7
2.1.1 Composition en pin rouge des parcelles après l'éclaircie	7
2.1.2 Nombre de tiges	7
2.1.3 Diamètre moyen quadratique	9
2.1.4 Surface terrière	11
2.1.5 Volume marchand brut du pin rouge	12
2.2 Croissance en diamètre du pin rouge et du pin blanc	12
2.2.1 Accroissement du DHP.....	12
2.2.2 Accroissement en surface terrière par arbre.....	14
2.3 Production	14
2.3.1 Toutes les espèces	14
2.3.2 Pin rouge.....	16

Chapitre 3 – Discussion	29
3.1 Comparaisons entre les traitements	29
3.2 Évolution de la composition des pinèdes à la suite des éclaircies	29
3.3 Croissance en diamètre des pins rouges.....	30
3.4 Rendement selon les traitements.....	30
3.5 Productivité et valeur marchande selon la grosseur des pins rouges.....	31
3.6 Éclaircie tardive des pinèdes à pin rouge naturelles	32
3.7 Densité résiduelle et production de poteaux.....	33
3.8 Comparaison entre le pin rouge et le pin blanc	34
Conclusion et recommandations	35
Références bibliographiques	37
Annexes	41

Liste des tableaux

Tableau 1. Valeurs minimales de DHP estimées selon Ung <i>et al.</i> (2013) pour chacune des classes de qualité de billes du pin rouge, par traitement	5
Tableau 2. Variables dendrométriques mesurées dans chaque traitement pour le pin rouge et pour l'ensemble des espèces avant, immédiatement après, 10 ans après et 25 ans après l'éclaircie	8
Tableau 3. Nombre de tiges vivantes après l'éclaircie et mortes après 25 ans, et taux de mortalité par espèce	9
Tableau 4. Nombre de tiges et DHP moyen quadratique des espèces du couvert dominant (100 plus grosses tiges à l'hectare) immédiatement après et 25 ans après l'éclaircie, par parcelle et par traitement	10
Tableau 5. Surface terrière et bilan de production par traitement et parcelle avant, immédiatement après, et 25 ans après l'éclaircie, pour l'ensemble les arbres de DHP $\geq 9,1$ cm (toutes espèces confondues)	15
Tableau 6. Surface terrière par traitement et par parcelle avant, immédiatement après, et 25 ans après l'éclaircie, et bilan de production pour différentes classes de DHP de pin rouge	19
Tableau 7. Nombre de tiges par traitement et par parcelle avant, immédiatement après, et 25 ans après l'éclaircie, et bilan de production pour différentes classes de DHP de pin rouge	23

Liste des figures

Figure 1.	Proportion de la surface terrière totale de chaque parcelle occupée après l'éclaircie par le pin rouge, le pin blanc, les feuillus et les autres résineux	7
Figure 2.	Nombre de recrues par hectare des principales espèces selon le traitement, 25 ans après l'éclaircie	7
Figure 3.	Évolution dans le temps du nombre de gaules par hectare selon le traitement, par espèce et pour l'ensemble des espèces commerciales	11
Figure 4.	Répartition de la surface terrière en pin rouge après l'éclaircie et 25 ans plus tard, par classe de DHP de sciage, pour chacun des traitements	12
Figure 5.	Croissance individuelle et moyenne des pins rouges et des pins blancs, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, en fonction de leur classe de DHP après l'éclaircie	13
Figure 6.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des arbres de DHP $\geq 9,1$ cm pour l'ensemble des espèces, en fonction de la surface terrière totale après l'éclaircie	14
Figure 7.	Production périodique annuelle par parcelle des arbres de DHP $\geq 9,1$ cm, pour l'ensemble des espèces et pour le pin rouge, pendant les périodes allant de 1 à 10 ans et de 11 à 25 ans après l'éclaircie	17
Figure 8.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des pins rouges de DHP $\geq 9,1$ cm en fonction de la proportion de la surface terrière en pin rouge après l'éclaircie	18
Figure 9.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des pins rouges de dimension sciage (DHP $\geq 24,1$ cm) en fonction de la proportion de leur surface terrière après l'éclaircie	20
Figure 10.	Estimation de la production en pin rouge de dimension sciage (DHP $\geq 24,1$ cm) pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie dans les traitements EC23 et EC18, en fonction de la proportion de la surface terrière des pins rouges marchands (DHP $\geq 9,1$ cm) après l'éclaircie..	21
Figure 11.	Recrutement en pin rouge de dimension de sciage (DHP ≥ 24 cm) et de dimension de poteau (DHP ≥ 32 cm), pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, dans les traitements EC23 et EC18	22
Figure 12.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des pins rouges de dimension poteau (DHP $\geq 32,1$ cm) en fonction de la proportion de leur surface terrière après l'éclaircie	25
Figure 13.	Taux de production du pin rouge (m^2 de production 25 ans après l'éclaircie par m^2 de surface terrière après l'éclaircie), par classe de DHP après l'éclaircie et par traitement	27

Liste des annexes

Annexe 1. Carte de la répartition des parcelles de la pinède à pin rouge et des dépôts de surface	41
Annexe 2. Modélisation de la relation hauteur-DHP pour le pin rouge	41
Annexe 3. Nombre à l'hectare de tiges vivantes de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm) immédiatement après l'éclaircie et 25 ans après l'éclaircie, et nombre de tiges marchandes mortes et recrues, par espèce et par traitement	44
Annexe 4. Distribution du nombre de pins rouges après l'éclaircie et 25 ans après celle-ci, par classe de DHP de 2 cm, dans chacune des parcelles	45
Annexe 5. Nombre de gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm) par hectare 25 ans après l'éclaircie, par espèce, par parcelle et par traitement	46
Annexe 6. Accroissement en diamètre 25 ans après l'éclaircie en fonction du DHP après l'éclaircie, et moyenne de l'accroissement en diamètre par classe de DHP, le tout par traitement, pour les principales espèces autres que le pin blanc et le pin rouge	47
Annexe 7. Surface terrière et proportion des pins rouges présents au départ et coupés lors de l'éclaircie par classe de DHP et par parcelle	49
Annexe 8. Longueur et proportion du fût et du houppier des pins rouges de DHP \geq 30,1 cm en fonction de leur hauteur totale 25 ans après l'éclaircie, selon les traitements	50
Annexe 9. Comparaison de l'évolution de la hauteur totale en fonction de l'âge pour le pin blanc et le pin rouge, selon 3 études	51
Annexe 10. Nombre de tiges marchandes (DHP \geq 9,1 cm) mortes et survivantes des espèces de résineux par classe de DHP de 5 cm après l'éclaircie, sur une période de 25 ans	52
Annexe 11. Nombre de tiges marchandes (DHP \geq 9,1 cm) mortes et survivantes des espèces de feuillus par classe de DHP de 5 cm après l'éclaircie, sur une période de 25 ans	53

Liste des abréviations et des termes utilisés dans ce document

ACC SURV	Production par accroissement des survivants.
Couvert dominant	100 plus grosses tiges par hectare.
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine, mesuré à 1,3 m du sol.
DHPq	DHP moyen quadratique; correspond au DHP d'un arbre qui aurait la moyenne de la surface terrière de l'ensemble des arbres.
Dimension marchande	Qualifie les tiges dont le DHP est de 9,1 cm et plus (arbres marchands). Pour le pin rouge, cette classe inclut celles de dimension sciage (DHP \geq 24,1 cm) et de dimension poteau (DHP \geq 32,1 cm).
Dimension sciage	Pour le pin rouge, cette classe correspond aux tiges dont le DHP est de 24,1 cm et plus (voir la section 1.4.2). Cette classe inclut celle de dimension poteau (DHP \geq 32,1 cm).
Dimension poteau	Pour le pin rouge, cette classe correspond aux tiges dont le DHP est de 32,1 cm et plus (voir la section 1.4.2).
EC13	Traitement d'éclaircie de surface terrière résiduelle de 13,1 m ² ·ha ⁻¹ (parcelle 16).
EC18	Traitement d'éclaircie de surface terrière résiduelle moyenne de 18,5 m ² ·ha ⁻¹ (parcelles 02 et 04).
EC23	Traitement d'éclaircie de surface terrière résiduelle moyenne de 23,5 m ² ·ha ⁻¹ (parcelles 01 et 03).
Gaule	Arbre dont le DHP est compris entre 1,1 et 9,0 cm.
Peupliers	Comprend surtout le peuplier à grandes dents et, dans une moindre mesure, le peuplier faux-tremble.
Pmp	Pied mesure de planche; unité de volume utilisée pour les bois sciés et équivaut à une pièce de bois d'un pied carré de surface par un pouce d'épaisseur.
Production	Quantité de bois produit sur une superficie donnée.
Production interne	Différence entre la production par accroissement des survivants et la mortalité.
Production nette	Somme de la production interne et du recrutement. Synonyme de rendement.
REC	Recrutement.
VMB	Volume marchand brut; volume ligneux du tronc et des branches sous écorce compris entre une hauteur de souche de 15 cm et un diamètre d'utilisation de 9,1 cm avec écorce (Perron 2003).

Liste des espèces mentionnées dans ce document

Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i> Marshall
Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i> Britton
Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i> Linnaeus
Épinette blanche	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss
Érable de Pennsylvanie	<i>Acer pensylvanicum</i> Linnaeus
Érable rouge	<i>Acer rubrum</i> Linnaeus
Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrhart
Noisetier à long bec	<i>Cornus cornuta</i> Marshall
Ostryer de Virginie	<i>Ostrya virginiana</i> (Miller) K. Koch.
Peuplier à grandes dents	<i>Populus grandidentata</i> Michaux
Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i> Michaux
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i> Linnaeus
Pin gris	<i>Pinus banksiana</i> Lambert
Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i> Aiton
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i> (Linnaeus) Miller

Remerciements

Je tiens à remercier M. Jean-Louis Brown, ingénieur forestier retraité de notre Direction, pour la conception et l'établissement du dispositif expérimental en 1987. Mes remerciements s'adressent également à M. Daniel Lebel, technicien forestier retraité de notre Direction, pour son dévouement et son implication personnelle à mener à bien les travaux de terrain et la saisie de données, ainsi que pour les longues journées et semaines passées sur le terrain dans des conditions souvent inconfortables. Je remercie les autres techniciens forestiers, dont M. Guy Brousseau qui est retraité de notre Direction, ainsi que les nombreux étudiants qui ont participé à l'établissement et à la cueillette des données au fil des années, dont M^{mes} Isabelle Dumont et Marie-Pier Gouin, MM. Thierry Arbour, François Berthiaume, Jean-Guy Boissonneault, Dominic Boucher, Pierre Duval, Jocelyn Hamel, Bruno Joly, Éric Mercier, Richard Nadeau, Sylvain Thivierge, ainsi que ceux dont je ne puis retracer les noms. Je remercie également la firme Consultants Forestiers M.S. inc. pour le mesurage du dispositif 25 ans après l'éclaircie.

Je remercie M^{me} Lise Charette, statisticienne à notre Direction, d'avoir effectué les analyses statistiques et d'avoir écrit la description des méthodes statistiques utilisées; je lui en suis très reconnaissant et entièrement redevable. Je remercie également M. Jean Noël, technicien spécialisé en géomatique, pour l'illustration de l'annexe 1. Je remercie M^{me} Patricia Raymond, qui a agi comme responsable de la révision scientifique, ainsi que les 2 réviseurs anonymes qui ont évalué ce mémoire et M. François Guillemette pour ses commentaires. Enfin, mes remerciements s'adressent à l'équipe de diffusion et de transfert de connaissances, en particulier M^{me} Denise Tousignant et M. Alexandre Dallaire-Théroux pour la traduction du résumé vers l'anglais et l'édition du document, ainsi qu'à M^{me} Maripierre Jalbert pour le graphisme et la mise en page.

Les travaux dont les résultats sont présentés dans ce document ont été réalisés et financés par la Direction de la recherche forestière dans le cadre des projets successifs n^{os} R82411 (début : 1984; titulaire initial : Jean-Louis Brown), 0904 140S, 11231 0019 et enfin, l'actuel projet n^o 142332019.

Introduction

Le pin rouge est une espèce commerciale dont le bois est utilisé surtout pour le sciage, et le tronc pour le façonnage de poteaux. Dans l'aménagement des pinèdes à pin rouge, il est conseillé de pratiquer des éclaircies afin de maintenir une densité optimale pour la croissance des arbres et la production de bois d'œuvre (Benzie 1977, Martin et Lorimer 1996). De nombreuses études ont été publiées sur le rendement des plantations de pin rouge après l'éclaircie, notamment en Ontario et dans la région des Grands Lacs aux États-Unis (Cooley 1969, Day et Rudolph 1972, Erickson 1996, Gilmore *et al.* 2005, Liechty *et al.* 1986, Lundgren 1981, Mulloy 1946, Sheedy 1997, von Althen et Stiehl 1990, Wilson 1955, Woods et Penner 2000). Ces études ont généralement été réalisées en bas âge (< 40 ans). Pour les pinèdes à pin rouge naturelles, Eyre et Zehngraff (1948) mentionnent que c'est à des âges de 50 à 80 ans que l'éclaircie commerciale pourra vraiment être rentable.

Cependant, très peu d'études ont porté sur l'effet de l'éclaircie sur le pin rouge en peuplements naturels de plus de 50 ans. Les travaux d'Eyre et Zehngraff (1948) et de Smithers (1954) rapportent des résultats très sommaires pour certaines parcelles. Ceux de Bradford et Palik (2009), D'Amato *et al.* (2010) et de Powers *et al.* (2010) rapportent les

résultats à long terme obtenus à la suite d'éclaircies répétées à intervalles de 5 à 10 ans afin de maintenir une gamme de surfaces terrières résiduelles, pour 2 dispositifs expérimentaux établis au Minnesota (l'une de ces forêts est issue d'un ensemencement artificiel). Aucune étude détaillée n'a été publiée sur les effets à long terme d'une éclaircie tardive dans des pinèdes à pin rouge naturelles.

Afin de cerner l'influence de la densité résiduelle après l'éclaircie sur la croissance des pins rouges et sur le rendement de pinèdes à pin rouge naturelles de plus de 50 ans, 3 coupes d'éclaircie commerciale de différentes intensités ont été réalisées en 1987 dans des pinèdes à pin rouge de plus de 80 ans, en collaboration avec le ministère des Ressources naturelles du Québec, le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec et la compagnie Stone Consolidated inc. La description du dispositif expérimental, les caractéristiques dendrométriques de la forêt avant et après l'éclaircie, ainsi que les données de récolte ont été consignées par Brown (1994), et les résultats de croissance et de rendement 10 ans après l'éclaircie ont été présentés par Godbout (2016). Le présent document présente les caractéristiques dendrométriques, la croissance et le rendement 25 ans après ces éclaircies.

Chapitre 1 – Matériel et méthodes

Le lecteur peut se référer aux documents de Brown (1994) et de Godbout (2016) pour obtenir de plus amples informations sur le site d'étude, le dispositif expérimental et la coupe d'éclaircie, de même que les mesurages effectués avant et après l'éclaircie, ainsi que 10 ans après celle-ci.

Dans le texte, l'expression « après l'éclaircie » sera utilisée en référence aux valeurs observées immédiatement après la coupe d'éclaircie.

1.1 Site d'étude

La forêt du Ruisseau-de-l'Indien fait partie du domaine public. Elle se situe près de la rivière des Outaouais, entre Fort-Coulonge et Rapides-des-Joachims, vis-à-vis de la ville ontarienne de Deep River. Elle est issue de coupes effectuées au milieu des années 1940 visant à enlever le couvert mature de peupliers (*Populus* sp.) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lambert). Le relief est composé principalement de replats formés par des levées de plage constituées de sables fins et moyens. Sur ces dépôts marins d'eau peu profonde (5S; MFFP 2015), les sols appartiennent au groupe des podzols humo-ferriques et présentent un horizon Ae généralement peu développé. Cette forêt fait partie du sous-domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest et de la sous-région écologique méridionale 3a-M (Gosselin 2002). La saison de végétation dure de 170 à 180 jours et les précipitations annuelles moyennes varient de 800 à 1 000 mm, avec une fraction nivale de 25 %.

1.2 Dispositif expérimental

Au total, 5 parcelles ont été établies en 1987 avant l'éclaircie (voir l'annexe 1). Elles sont de 2 grandeurs et formes différentes : les parcelles 01 à 04 sont carrées et mesurent 100 m × 100 m (1 ha); la parcelle 16 est rectangulaire et mesure 50 m × 100 m (0,5 ha). Chacune des parcelles a été subdivisée en sous-parcelles carrées de 10 m × 10 m, puis en sous-sous-parcelles carrées de 5 m × 5 m. Les parcelles font partie d'une coupe d'éclaircie plus vaste, de sorte que la forêt qui les entoure a subi le même traitement d'éclaircie (figure 5 dans Brown 1994). Il n'y avait pas de témoin non éclairci dans ce dispositif expérimental.

À l'origine, le dispositif expérimental comportait des blocs de coupe avec de objectifs de surface terrière résiduelles de 15, 20 et 25 m²·ha⁻¹, dans lesquels les parcelles étaient distribuées (Brown 1994). Les résultats après l'éclaircie ont montré que les surfaces terrières résiduelles des parcelles des blocs ne correspondaient pas aux valeurs souhaitées, de sorte que le plan d'expérience planifié n'a pas été obtenu. Afin de respecter le but de l'étude qui est de comparer différentes surfaces terrières résiduelles, les parcelles ont été regroupées a posteriori selon 3 niveaux de surface terrière après l'éclaircie :

- EC₂₃ : surface terrière résiduelle moyenne de 23,5 m²·ha⁻¹ (parcelles 01 [23,5 m²·ha⁻¹] et 03 [23,5 m²·ha⁻¹]);^a
- EC₁₈ : surface terrière résiduelle moyenne de 18,5 m²·ha⁻¹ (parcelles 02 [17,4 m²·ha⁻¹] et 04 [19,5 m²·ha⁻¹]);^b
- EC₁₃ : surface terrière résiduelle de 13,1 m²·ha⁻¹ (parcelle 16).^c

La parcelle 16 est différente des 4 autres à bien des égards. Avant l'éclaircie, elle était établie dans une pinède à pin gris surannée, alors que les autres étaient établies soit dans des pinèdes à pin rouge (parcelles 01, 02 et 03), soit dans une pinède à pin blanc et pin rouge (parcelle 04; Brown 1994). À la suite de la récolte prioritaire des pins gris lors de l'éclaircie, le peuplement de la parcelle 16 est devenu une pinède à pin rouge et à pin blanc. Comme les pins rouges avaient poussé sous le couvert des pins gris, ils étaient plus petits que dans les autres parcelles. De plus, la parcelle 16 a une superficie de 0,5 ha, et le pin rouge n'occupait que le tiers de la surface terrière après l'éclaircie. Comme elle constitue la seule parcelle du traitement EC₁₃, il est difficile de distinguer l'effet du traitement de celui de la parcelle. Pour cette raison, les comparaisons de l'EC₁₃ avec les 2 autres traitements doivent être interprétées avec prudence. Néanmoins, les résultats de l'éclaircie pratiquée dans cette pinède à pin gris surannée demeurent instructifs.

Comme les parcelles n'ont pas été réparties aléatoirement selon les traitements avant la coupe, mais regroupées après la coupe selon les valeurs de surface terrière résiduelle obtenues, le lecteur devra interpréter les résultats avec prudence, car

^a Dans la publication de Godbout (2016), ce groupe correspond à la surface terrière après coupe (ST_{APC}) moyenne.

^b Dans la publication de Godbout (2016), ce groupe correspond à la ST_{APC} basse.

^c Dans la publication de Godbout (2016), cette parcelle était associée à la ST_{APC} très basse.

l'effet des traitements peut être confondu avec celui d'autres variables. De plus, comme chacun des traitements comporte un très petit nombre de répétitions (de 1 à 2 parcelles), l'effet de parcelle est grand.

Quatre des 5 parcelles ont une superficie de 1,0 ha; cela signifie que les valeurs à l'hectare pour ces parcelles représentent les valeurs observées sur une portion de forêt d'un hectare, et ne résultent pas de la moyenne des valeurs de nombreuses parcelles plus petites. En ce sens, elles correspondent à de « vraies » valeurs à l'hectare.

1.3 Mesurage 25 ans après l'éclaircie

1.3.1 Tiges de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm)

Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) a été mesuré avec une précision de l'ordre du millimètre (mm) sur chacune des tiges vivantes de DHP \geq 9,1 cm à l'aide d'un galon circonférentiel métallique. Les recrues (tiges de DHP $<$ 9,1 cm lors du mesurage 10 ans après l'éclaircie et qui ont dépassé ce seuil durant la période allant de 11 à 25 ans après l'éclaircie) qui étaient mortes n'ont pas été mesurées. L'espèce a été identifiée pour les nouvelles tiges (recrues), et vérifiée pour celles qui avaient déjà été mesurées précédemment. La hauteur totale et celle de la base du houppier des pins rouges ont été mesurées en échantillonnant le plus gros pin rouge présent dans 25 des sous-parcelles de 100 m² réparties de façon à couvrir l'ensemble de la parcelle; les mesures ont été prises à l'aide d'un clinomètre mécanique (Suunto) et d'une chaîne à mesurer, en veillant à ne pas dépasser un angle de 45 degrés.

1.3.2 Gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm)

Les gaules, c'est-à-dire les tiges vivantes dont le DHP était compris entre 1,1 et 9,0 cm, ont été dénombrées par classe de 2 centimètres (cm) à l'aide d'un gabarit. Tous les pins blancs, les pins gris et les pins rouges ont été dénombrés dans chacune des sous-sous-parcelles de 25 m² (taux d'échantillonnage de 100 %), alors que les autres espèces ont été dénombrées seulement dans la sous-sous-parcelle du coin supérieur gauche des sous-parcelles (taux d'échantillonnage de 25 %).

1.4 Calculs

1.4.1 Relation hauteur-DHP et volume marchand brut du pin rouge

Le volume marchand brut (VMB) du pin rouge a été calculé selon le tarif de cubage de Perron (2003). Une relation hauteur-DHP a été calculée à partir

des mesures de DHP et de hauteur totale (H) effectuées sur 116 pins rouges lors du mesurage réalisé 25 ans après l'éclaircie. Trois modèles ont été testés (annexe 2) :

- le modèle utilisé dans Godbout (2016) :
 $Ht = a + b \text{ DHP} + c (\sqrt{\text{DHP}})$
- le modèle logarithmique :
 $Ht = a + b \ln (\text{DHP})$
- le modèle de Chapman-Richards :
 $Ht = 1,3 + a (1 - e^{-b\text{DHP}})^c$ (Richards 1959).

Malgré la bonne performance des 3 modèles, le choix s'est arrêté sur le modèle logarithmique parce que c'est le seul pour lequel l'estimation de la hauteur différerait selon les traitements (le traitement EC23 différerait des traitements EC18 et de EC13; voir l'annexe 2), et qu'en principe, cette différence concordait avec celles observées pour la croissance en diamètre (voir la figure 5a à la section 2.2.1). Le modèle utilisé a été le suivant :

$$Ht = -7,5676 + 8,3999 * \ln (\text{DHP}) + 1,5556 * X \quad (\text{éq. 1})$$

où Ht est la hauteur totale (m), DHP correspond au DHP (cm) et $X = 1$ pour le traitement EC23 et $X = 0$ pour les traitements EC18 et EC13.

Cette équation a été utilisée pour estimer le volume des pins rouges 25 ans après l'éclaircie, de même que pour les 2 périodes de mesurage précédentes (avant l'éclaircie et 10 ans après l'éclaircie) en utilisant $X = 1$.

1.4.2 Valeurs minimales de DHP des classes de qualité sciage et poteau

Dans le manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État (Boulianne 2019), 3 classes de qualité pour les billes de sciage de pin rouge sont définies : G, H et I, chacune avec un diamètre minimal sans écorce au fin bout et une longueur minimale de bille qui lui sont propres. Ainsi, pour la classe de qualité G, ce diamètre est de 36 cm pour une bille d'au moins 3,7 m de long; pour la classe H, il est de 24 cm pour une bille d'au moins 3,1 m; et enfin, pour la classe I, le diamètre minimal est de 20 cm pour une bille d'au moins 2,5 m. Afin de regrouper les pins rouges de la présente étude dans une de ces 3 classes de qualité, les dimensions du DHP avec écorce correspondant aux valeurs minimales de diamètre au fin bout pour la longueur minimale exigée à chacune des classes de qualité ont été calculées en appliquant ces valeurs à la bille de pied. De même, pour la classe de qualité « poteau » (classe F), le diamètre minimal

avec écorce est de 30 cm à 1,8 m du gros bout, et d'au moins 18 cm au fin bout pour une longueur minimale de bille de 11 m. L'équation de défilement d'Ung *et al.* (2013) pour le pin rouge (équation 4a dans Ung *et al.* 2013) a été utilisée pour estimer le DHP minimal associé à chacune des classes de qualité; les données ayant servi à bâtir cette équation ont été relevées sur 461 pins rouges provenant de l'Ontario et du Québec.

Comme le mesurage des billes est basé sur des classes de diamètre de 2 cm (Boulianne 2019), les valeurs minimales de diamètre au fin bout sans écorce utilisées pour les calculs ont été respectivement de 35,1 cm, 23,1 cm et 19,1 cm pour les classes G, H et I; pour la classe F, le diamètre minimal avec écorce a été de 29,1 cm au gros bout et de 17,1 cm au fin bout. Étant donné que le modèle d'Ung *et al.* (2013) utilise le diamètre avec écorce comme intrant, le diamètre avec écorce au fin bout a été estimé pour les classes G, H et I en utilisant la relation développée pour le pin rouge par Perron (2003) pour relier le DHP sans écorce au DHP avec écorce. La hauteur de souche a été fixée à 30 cm du sol (entre autres pour tenir compte d'une surlongueur de bille), et la relation hauteur-DHP décrite à la section 1.4.1 (éq. 1) a été utilisée pour estimer la hauteur totale associée au DHP des pins rouges selon les traitements d'éclaircie.

Les valeurs de DHP calculées pour chacune des classes de qualité sont présentées au tableau 1. Pour la classe de qualité F, il faut aussi vérifier que le diamètre au fin bout soit d'au moins 17,1 cm à 11,3 m du sol (11 m + 30 cm). Pour le DHP minimal calculé de 31,5 cm, le diamètre au fin bout est estimé à 17,8 cm pour les pins rouges de l'EC23 et à 17,2 pour ceux de l'EC18 et de l'EC13, ce qui satisfait aux critères minimaux de cette classe de qualité. Après arrondissement, les classes de DHP minimales retenues dans ce document sont de 24,1 à 30,0 cm pour la classe de qualité I, de 30,1 à 46,0 cm pour la classe H, de 46,1 cm et plus pour la classe G et de 32,1 cm et plus pour la classe F.

Tableau 1. Valeurs minimales de DHP estimées selon Ung *et al.* (2013) pour chacune des classes de qualité de billes du pin rouge, par traitement.

Produit	Classe de qualité	Diamètre minimal avec écorce (cm)	Hauteur à partir du sol associée au diamètre minimal (m)	Valeurs minimales estimées du DHP (cm)		Valeurs minimales de DHP retenues pour les 3 traitements (cm)
				EC23	EC18 et EC13	
Poteau	F	29,1	2,1	31,5	31,5	32,1
	G	38,1	4,0	46,2	46,4	46,1
Sciage	H	25,3	3,4	30,0	30,1	30,1
	I	21,0	2,8	24,0	24,1	24,1

1.4.3 Production

1.4.3.1 Terminologie

Le **production** se définit comme la quantité de bois, généralement exprimée en surface terrière ou en volume, produite par les arbres de DHP $\geq 9,1$ cm pour une surface de référence de 1 ha au cours d'une période donnée. Elle intègre 3 composantes : la production par accroissement des tiges survivantes, la mortalité et le recrutement.

La **production par accroissement des survivants** est la quantité de bois générée par la croissance des arbres de DHP $\geq 9,1$ cm qui étaient vivants en début de période et qui sont toujours vivants en fin de période. Elle ne tient pas compte de l'accroissement des arbres qui sont morts en cours de période ni de l'accroissement des recrues. Elle constitue un gain pour la production.

La **mortalité** se définit comme la quantité de bois des arbres de DHP $\geq 9,1$ cm qui étaient vivants en début de période et qui sont morts pendant celle-ci. Elle a été calculée en utilisant la valeur du DHP en début de période et non celle en fin de période. Ainsi, même si l'arbre a crû durant plusieurs années avant de mourir au cours de la période, cet accroissement en diamètre n'a pas été comptabilisé. Elle constitue une perte pour la production.

Le **recrutement** se définit comme la quantité de bois constituée par les nouveaux arbres de DHP $\geq 9,1$ cm, c'est-à-dire ceux dont le DHP était plus petit que 9,1 cm en début de période et qui ont atteint un DHP d'au moins 9,1 cm en cours de période, tout en étant vivants à la fin de cette période. Les nouveaux arbres qui sont morts en cours de période ne sont pas comptabilisés dans ce calcul. Cette composante représente l'apport de bois issu d'arbres de petits diamètres et constitue un gain pour la production.

La **production interne** représente la production des arbres vivants de DHP $\geq 9,1$ cm présents en

début de période, sans tenir compte de l'apport externe dû au recrutement. Elle représente la différence entre la production par accroissement des survivants et la mortalité. Une valeur négative indique que la mortalité a été plus importante que l'accroissement; une valeur positive indique l'inverse.

La **production nette** est le rendement de la forêt, c'est-à-dire la différence entre les gains (production par accroissement des survivants + recrutement) et les pertes (mortalité). Il s'agit donc de la différence entre la quantité de bois en fin de période et celle en début de période.

En plus du bilan de la production des tiges marchandes de DHP $\geq 9,1$ cm pour l'ensemble des espèces, nous avons aussi calculé celui des pins rouges de dimension marchande (DHP $\geq 9,1$ cm), de dimension sciage (DHP $\geq 24,1$ cm), et de dimension poteau (DHP $\geq 32,1$ cm).

Le **taux de production** (ou productivité) est défini comme le rapport de la production (en m^3) obtenue durant la période d'observation sur la surface terrière (m^2) en début de période. Il est calculé par classe de DHP, et représente la production qui a été générée durant la période, pour chaque m^2 de surface terrière en début de période. Même si les arbres d'une classe de DHP montrent des accroissements plus grands en surface terrière que ceux d'une autre classe de DHP, cela ne veut pas dire pour autant que leur production par m^2 de surface terrière initiale est plus grande. Prenons comme exemple des arbres ayant des DHP de 20 cm et de 40 cm. Pour obtenir la même surface terrière qu'un arbre de 40 cm, il faut 4 arbres de 20 cm. Ainsi, pour obtenir une même productivité, l'accroissement en surface terrière d'un seul arbre de 40 cm devra être égal aux accroissements de 4 arbres de 20 cm.

1.4.3.2 Comparaison entre les traitements

Comme la proportion de la surface terrière des parcelles occupée par le pin rouge variait beaucoup entre les traitements (voir la figure 1 à la section 2.1.1), il a fallu en tenir compte dans les comparaisons entre ceux-ci. La production associée à chacun des traitements a donc été comparée sur la base d'une même proportion de la surface terrière en pin rouge après l'éclaircie, et non sur celle d'une même surface terrière en pin rouge. C'est parce que pour 2 traitements ayant une même proportion de pins rouges, celui avec la plus grande surface terrière résiduelle possède aussi la plus

grande surface terrière en pin rouge. Idéalement, il aurait été souhaitable que la proportion de pins rouges soit semblable pour tous les traitements. Cela aurait permis de bien évaluer les différences dues aux traitements. Mais comme ce n'était pas le cas, il a été supposé que pour un même traitement, la production augmentait de façon linéaire en fonction de la proportion de pin rouge. Ainsi, les traitements ont été évalués en comparant les droites de régression passant par l'origine et reliant la production en pin rouge des parcelles du traitement à leurs proportions (en surface terrière) en pin rouge après l'éclaircie.

1.4.3.3 Estimation de la production nette en pin rouge de dimension sciage et de dimension poteau

La production nette en pin rouge de dimension sciage (DHP $\geq 24,1$ cm) et poteau (DHP $\geq 32,1$ cm) est très dépendante du recrutement, donc de la quantité initiale de pin rouge de DHP $< 24,1$ cm (DHP $< 32,1$ cm). De plus, cette quantité, de même que la distribution diamétrale, variaient selon les parcelles. En conséquence, la production nette a été estimée pour de mêmes proportions en pin rouge de DHP $< 24,1$ cm (DHP $< 32,1$ cm) et pour une même distribution diamétrale, et ce, pour l'EC₂₃ et l'EC₁₈. Ainsi, la production nette a été calculée en utilisant les équations des droites de régression dans lesquelles la pente correspond à la production interne et l'ordonnée à l'origine correspond au recrutement (voir la figure 9a [section 2.3.2.1] pour les tiges de dimension sciage et la figure 12a [section 2.3.2.2] pour celles de dimension poteau). La pente moyenne de la production interne par traitement a été utilisée, et de nouvelles valeurs de recrutement ont été calculées en utilisant les mêmes proportions initiales en pin rouge de DHP $< 24,1$ cm (DHP $< 32,1$ cm), et la même distribution diamétrale relative de ces pins (moyenne des proportions du nombre de tiges par classe de DHP des 4 parcelles de l'EC₁₈ et de l'EC₂₃), pour des surfaces terrières après l'éclaircie de 18,0 ou 23,0 $m^2 \cdot ha^{-1}$. Le nombre de recrues de pin rouge a été calculé par classe de DHP en appliquant les proportions de recrutement de la figure 11a (voir la section 2.3.2.2) au nombre moyen de pins rouges par classe de DHP calculé à partir de la distribution diamétrale moyenne. Ensuite, la surface terrière des recrues de pin rouge a été calculée par classe de DHP en multipliant le nombre de recrues de pin rouge de chaque classe de DHP par leur surface terrière moyenne 25 ans après l'éclaircie. Finalement, le recrutement a été calculé comme la somme des surfaces terrières des recrues de pin rouge par classe de DHP.

Chapitre 2 – Résultats

2.1 Caractéristiques dendrométriques des parcelles

2.1.1 Composition en pin rouge des parcelles après l'éclaircie

Immédiatement après l'éclaircie, la proportion de la surface terrière occupée par le pin rouge variait selon les parcelles (figure 1). Le pin rouge dominait nettement dans les parcelles 01, 02 et 03 (de 59 % à 77 % de la surface terrière). La parcelle 04 contenait des proportions de surface terrière équivalentes de pin rouge (41 %) et de pin blanc (38 %), mais la proportion de pins rouges de grosses dimensions était plus grande. C'était dans la parcelle 16 que la proportion de surface terrière occupée par le pin rouge était la plus faible (34 %).

2.1.2 Nombre de tiges

2.1.2.1 Tiges de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm)

Vingt-cinq ans après l'éclaircie, le nombre moyen de tiges marchandes a peu augmenté dans les parcelles de l'EC23 (+3 %; 595 tiges·ha⁻¹) et de l'EC18 (+1 %; 608 tiges·ha⁻¹), alors qu'il a augmenté de 224 tiges·ha⁻¹ (41 %) pour l'EC13 pour atteindre 772 tiges·ha⁻¹ (tableau 2).

Autres résineux	2 %	4 %	4 %	2 %	15 %
Feuillus	10 %	14 %	21 %	18 %	24 %
Pin blanc	11 %	14 %	16 %	38 %	27 %
Pin rouge	77 %	67 %	59 %	41 %	34 %

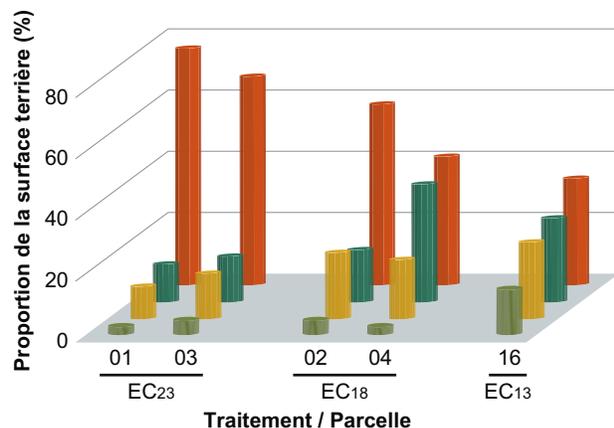


Figure 1. Proportion de la surface terrière totale de chaque parcelle occupée après l'éclaircie par le pin rouge, le pin blanc, les feuillus et les autres résineux. Feuillus = bouleau à papier, bouleau jaune, chêne rouge, érable rouge, hêtre à grandes feuilles, peuplier à grandes dents et peuplier faux-tremble. Autres résineux = épinette blanche, pin gris et sapin baumier.

Chez les résineux, le sapin baumier a été l'espèce avec le plus grand recrutement (33, 36 et 178 tiges·ha⁻¹ en moyenne pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13), suivi du pin blanc (de 17 à 24 tiges·ha⁻¹), du pin rouge et de l'épinette blanche (figure 2). Les taux de mortalité les plus élevés ont été observés chez le pin gris (74 %) et le sapin baumier (69 %); le pin rouge est l'espèce qui a montré le plus faible taux de mortalité (9 %; tableau 3).

Le nombre de pins rouges a légèrement diminué en 25 ans (baisse de 5 à 8 %; tableau 2). Il a diminué fortement dans les classes de petits DHP à cause de la mortalité, du faible recrutement et de la croissance en diamètre (annexes 3 et 4). Par contre, le nombre de tiges a augmenté dans les classes de plus gros DHP, à cause de l'absence de mortalité et de la croissance en diamètre. Alors que le DHP des plus gros pins rouges dépassait rarement 45 cm dans les parcelles de l'EC18 et de l'EC23 après l'éclaircie, plusieurs ont atteint des DHP de 50 cm et plus après 25 ans (maximum de 56 cm).

Chez les feuillus, l'érable rouge a été l'espèce avec le plus fort recrutement (de 26 à 46 tiges·ha⁻¹) pour les 3 traitements (figure 2), si l'on ne tient pas compte du peuplier à grandes dents, qui a montré un très fort recrutement pour le traitement EC13 (64 tiges·ha⁻¹), mais pas pour les 2 autres (6 et 11 tiges·ha⁻¹). Les taux de mortalité les plus élevés

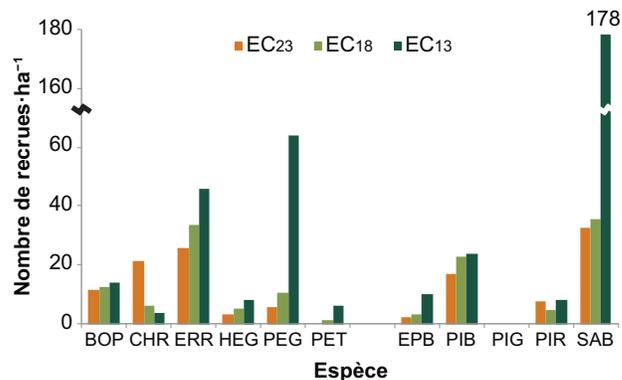


Figure 2. Nombre de recrues par hectare des principales espèces selon le traitement, 25 ans après l'éclaircie. Pour les traitements EC23 et EC18, la valeur représente la moyenne des 2 parcelles. BOP = bouleau à papier; CHR = chêne rouge; ERR = érable rouge; HEG = hêtre à grandes feuilles; PEG = peuplier à grandes dents; PET = peuplier faux-tremble; EPB = épinette blanche; PIB = pin blanc; PIG = pin gris; PIR = pin rouge; SAB = sapin baumier.

Tableau 2. Variables dendrométriques mesurées dans chaque traitement pour le pin rouge et pour l'ensemble des espèces avant, immédiatement après, 10 ans après et 25 ans après l'éclaircie.

Espèce	Variable	Traitement	Moment de la mesure*				Différence†			
			Avant l'éclaircie	Après l'éclaircie	10 ans après l'éclaircie	25 ans après l'éclaircie	Avant l'éclaircie – l'éclaircie	Après l'éclaircie – l'éclaircie	Avant l'éclaircie – l'éclaircie (25 ans – l'éclaircie)	
Toutes les espèces	Nombre de tiges·ha ⁻¹	EC23	857 (32)	580 (41)	556 (52)	595 (44)	277	–	–	15 (3 %)
		EC18	980 (45)	600 (2)	580 (8)	608 (34)	380	–	–	8 (1 %)
		EC13	924	548	552	772	376	–	–	224 (41 %)
Toutes les espèces	DHP moyen quadratique (cm)	EC23	23,9 (0,7)	22,7 (0,8)	25,8 (1,2)	27,7 (1,2)	1,1	–	–	4,9 (22 %)
		EC18	21,3 (0,1)	19,8 (0,5)	23,1 (0,6)	26,1 (0,9)	1,5	–	–	6,3 (32 %)
		EC13	20,8	17,4	20,6	22,0	3,3	–	–	4,6 (26 %)
Pin rouge	Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	EC23	38,3 (0,8)	23,5 (0,0)	28,8 (0,0)	35,6 (0,4)	14,9	–2,8	(–7 %)	12,1 (51 %)
		EC18	34,9 (1,1)	18,4 (1,1)	24,4 (1,0)	32,4 (0,3)	16,5	–2,5	(–7 %)	13,9 (76 %)
		EC13	31,3	13,1	18,5	29,4	18,2	–1,9	(–6 %)	16,3 (124 %)
Pin rouge	Nombre de tiges·ha ⁻¹	EC23	399 (7)	324 (12)	305 (14)	301 (14)	76	–	–	–23 (–7 %)
		EC18	257 (102)	215 (79)	210 (78)	204 (74)	42	–	–	–12 (–5 %)
		EC13	234	190	178	174	44	–	–	–16 (–8 %)
Pin rouge	DHP moyen quadratique (cm)	EC23	26,0 (1,2)	25,8 (1,3)	29,6 (1,6)	33,3 (1,7)	0,1	–	–	7,5 (29 %)
		EC18	24,1 (3,3)	24,2 (3,2)	28,5 (3,7)	33,3 (3,6)	–0,2	–	–	9,1 (38 %)
		EC13	17,7	17,3	23,0	29,1	0,4	–	–	11,8 (68 %)
Pin rouge	Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	EC23	21,2 (2,4)	16,9 (1,1)	20,9 (1,3)	26,2 (1,4)	4,3	5	(23 %)	9,2 (55 %)
		EC18	10,6 (1,5)	9,1 (1,1)	12,3 (1,5)	16,6 (2,6)	1,5	5,9	(56 %)	7,4 (82 %)
		EC13	5,7	4,5	7,4	11,5	1,3	5,8	(101 %)	7,1 (158 %)
Pin rouge	Volume marchand brut (m ³ ·ha ⁻¹)	EC23	194 (25)	155 (13)	199 (16)	262 (21)	40	67	(35 %)	107 (69 %)
		EC18	93 (8)	80 (5)	114 (9)	151 (19)	13	57	(62 %)	71 (88 %)
		EC13	45	34	64	101	11	56	(125 %)	67 (200 %)

* Les valeurs entre parenthèses correspondent à l'écart des valeurs des parcelles par rapport à la moyenne pour le traitement.

† Les valeurs entre parenthèses correspondent à la différence relative.

Tableau 3. Nombre de tiges vivantes après l'éclaircie et mortes après 25 ans, et taux de mortalité par espèce (total pour l'ensemble des parcelles éclaircies et témoins).

Groupe d'espèces	Espèce	Nombre de tiges		Taux de mortalité
		Vivantes après l'éclaircie	Mortes après 25 ans	
Résineux	Pin gris	90	67	74 %
	Sapin baumier	52	36	69 %
	Épinette blanche	16	5	31 %
	Pin blanc	645	105	16 %
	Pin rouge	1 172	105	9 %
Feuillus	Peuplier faux-tremble	107	66	62 %
	Bouleau à papier	105	51	49 %
	Peuplier à grandes dents	162	67	41 %
	Érable rouge	229	41	18 %
	Chêne rouge	47	8	17 %

ont été observés chez le peuplier faux-tremble (62 %), le bouleau à papier (49 %) et le peuplier à grandes dents (41 %; tableau 3).

Vingt-cinq ans après l'éclaircie, le couvert dominant, composé des 100 plus grosses tiges à l'hectare, s'est enrichi en pin rouge et/ou en pin blanc selon les parcelles, alors que le nombre de tiges des autres espèces a diminué ou est resté inchangé (tableau 4). Le bouleau à papier, l'érable rouge, le peuplier faux-tremble et le pin gris sont disparus du couvert dominant 25 ans après l'éclaircie.

2.1.2.2 Gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm)

Vingt-cinq ans après l'éclaircie, le nombre total de gaules d'espèces commerciales variait en moyenne de 4 000 à 5 000 gaules·ha⁻¹ selon les traitements (figure 3). De la 5^e à la 10^e année après l'éclaircie, le nombre de gaules a augmenté pour chacun des traitements. Par contre, de la 10^e à la 25^e année après l'éclaircie, leur nombre a peu changé pour l'EC23 et l'EC18, alors qu'il a diminué pour l'EC13. En moyenne, de 66 à 79 % des gaules étaient des feuillus (annexe 5).

Chez les feuillus, l'érable rouge constituait près des deux tiers des gaules (de 1 724 à 2 352 gaules·ha⁻¹), suivi du peuplier à grandes dents (de 244 à 568 gaules·ha⁻¹; annexe 5). L'érable rouge, qui était très peu présent avant l'éclaircie (< 250 gaules·ha⁻¹), a fortement augmenté en nombre avec le temps, alors que les peupliers ont diminué de près de 75 % entre la 10^e et la 25^e année après l'éclaircie.

Chez les résineux, le nombre de sapins baumiers, essence très peu présente avant

l'éclaircie (< 120 gaules·ha⁻¹; figure 3), a fortement augmenté après 25 ans, pour atteindre de 448 à 1 680 gaules·ha⁻¹ (annexe 5), soit de 71 à 97 % des gaules de ce groupe d'essences. Le nombre de gaules de pin blanc a augmenté dans les parcelles de l'EC23 (passant en moyenne de 70 gaules·ha⁻¹ après l'éclaircie à 371 gaules·ha⁻¹ 25 ans plus tard), mais pas dans celles des 2 autres traitements (figure 3). Pour le pin rouge, leur nombre a diminué avec le temps, passant de quelques dizaines de gaules par hectare après l'éclaircie à seulement quelques-unes (de 1 à 8 gaules·ha⁻¹) 25 ans après l'éclaircie (annexe 5).

Les gaules d'espèces non commerciales étaient beaucoup moins nombreuses, 25 ans après l'éclaircie (528 [288–1 220] gaules·ha⁻¹ après 25 ans pour l'ensemble des parcelles; données non présentées). Il s'agissait essentiellement de noisetiers à long bec, d'amélanchiers et d'érables de Pennsylvanie.

2.1.3 Diamètre moyen quadratique

Le diamètre moyen quadratique (DHPq) pour l'ensemble des espèces a augmenté en moyenne de 4,9 cm, 6,3 cm et 4,6 cm en 25 ans pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13, respectivement, pour atteindre des valeurs de 27,7 cm, 26,1 cm et 22,0 cm (tableau 2). Pour le pin rouge, le DHPq a augmenté davantage, selon un gradient inverse à la surface terrière résiduelle, soit de 7,5 cm, 9,1 cm et 11,8 cm pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13, respectivement, pour atteindre des valeurs de 33,3 cm, 33,3 cm et 29,1 cm après 25 ans. Le DHPq des pins rouges du couvert dominant a atteint des valeurs de 39,1 à 44,0 cm dans les parcelles de l'EC23 et l'EC18, et de 36,1 cm pour l'EC13, 25 ans après l'éclaircie (tableau 4).

Tableau 4. Nombre de tiges et DHP moyen quadratique des espèces du couvert dominant (100 plus grosses tiges à l'hectare) immédiatement après et 25 ans après l'éclaircie, par parcelle et par traitement.

Variable	Traitement	Parcelle	Après l'éclaircie										25 ans après l'éclaircie										Différence (25 ans – après l'éclaircie)									
			PIR	PIB	PEG	PET	PIG	Autres	Tout	PIR	PIB	PEG	PET	PIG	Autres	Tout	PIR	PIB	PEG	PET	PIG	Autres	Tout									
Nombre de tiges	EC23	01	95	2	3	—	—	—	—	—	—	100	94	4	2	—	—	—	—	—	—	—	100	-1	2	-1	—	—	—	0		
		03	82	5	11	—	1	100	83	12	4	—	0	100	83	12	4	—	0	1	100	1	7	-7	—	-1	—	—	—	0		
	EC18	02	73	12	10	—	1	4	100	72	23	4	—	0	1	100	72	23	4	—	0	1	100	-1	11	-6	—	-1	—	-3	0	
		04	58	38	—	3	—	1	100	66	34	—	0	—	0	100	66	34	—	0	—	0	100	8	-4	—	-3	—	-1	—	0	
DHP moyen quadratique (cm)	EC13	16	32	30	12	4	16	6	100	50	42	8	0	0	100	50	42	8	0	0	100	18	12	-4	-4	-16	—	-6	—	0		
		01	36,0	44,5	40,8	—	—	—	—	36,3	44,0	52,4	49,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	44,5	8,1	8,0	8,3	—	—	—	—	8,2	
	EC23	03	34,2	39,0	42,1	—	30,0	30,8	35,4	41,7	44,6	48,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38,4	42,3	7,5	5,6	6,3	—	—	—	7,6	6,9
		02	29,5	29,6	38,3	—	28,5	27,8	30,5	39,1	39,6	42,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37,1	39,3	9,5	10,0	3,9	—	—	—	9,3	8,8
EC18	04	35,0	35,3	—	35,5	—	28,8	35,0	43,2	47,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	44,6	8,2	12,1	—	—	—	—	—	9,6	
	16	24,1	26,3	37,2	35,4	21,9	23,4	26,8	36,1	40,9	44,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38,9	12,0	14,6	7,4	—	—	—	—	12,1	

PIR = pin rouge; PIB = pin blanc; PEG = peuplier à grandes dents; PET = peuplier faux-tremble; PIG = pin gris; Autres (après l'éclaircie) = bouleau à papier, chêne rouge, érable rouge et épinette blanche; Autres (25 ans après l'éclaircie) = chêne rouge et épinette blanche.

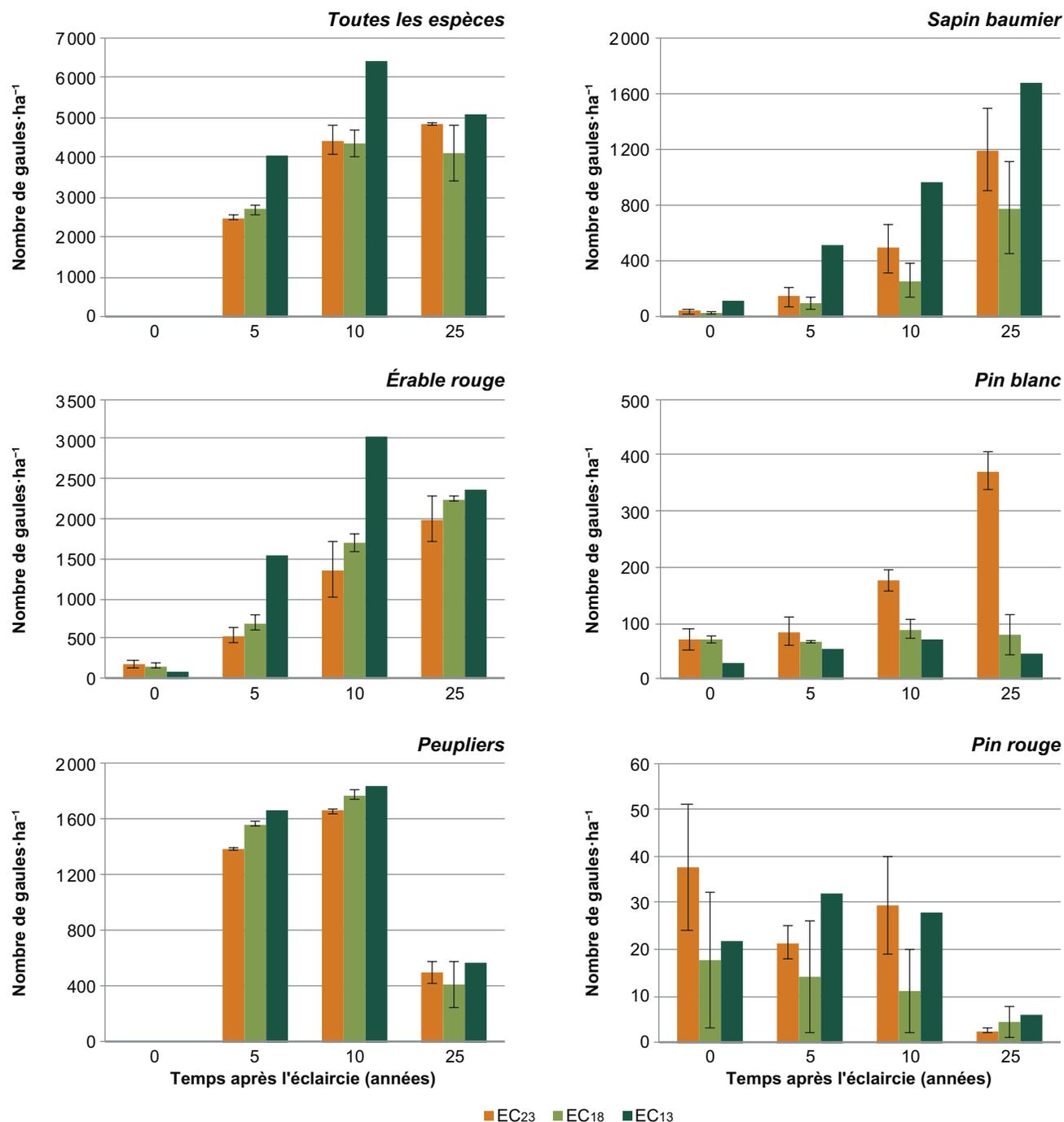


Figure 3. Évolution dans le temps du nombre de gaules par hectare selon le traitement, par espèce et pour l'ensemble des espèces commerciales. Les barres verticales indiquent l'étendue des valeurs des parcelles du traitement.

2.1.4 Surface terrière

Vingt-cinq ans après l'éclaircie, la surface terrière pour toutes les espèces a atteint en moyenne $35,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $32,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $29,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13, respectivement, ce qui correspond à des augmentations de $12,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $13,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $16,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (tableau 2). Les valeurs dans chacune des parcelles étaient toujours plus faibles qu'avant l'éclaircie, avec un manque à combler variant de

$1,9$ à $2,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (6 à 7 %). L'écart moyen entre les traitements a diminué 25 ans après l'éclaircie : il est passé de $5,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ après l'éclaircie à $3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ entre l'EC23 et l'EC18, de $5,4$ à $3,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ entre l'EC18 et l'EC13, et de $10,4$ à $6,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ entre l'EC23 et l'EC13.

Par contraste, si l'on considère seulement le pin rouge, la surface terrière dans chacune des parcelles était plus grande 25 ans après l'éclaircie qu'avant

celle-ci. L'augmentation moyenne a varié de 5,0 à 5,9 m²·ha⁻¹ selon le traitement (tableau 2). L'écart moyen entre le traitement EC23 et les 2 autres traitements a augmenté après 25 ans, alors qu'il est resté inchangé entre l'EC18 et l'EC13.

Vingt-cinq ans après l'éclaircie, la plus grande proportion de la surface terrière des pins rouges se trouvait dans la classe de DHP de 30 à 46 cm, soit celle correspondante aux dimensions minimales de la classe de qualité de sciage H (figure 4). Cette proportion variait peu entre les traitements (de 65 à 72 %), contrairement à la situation après l'éclaircie (de 3 à 55 %). Le plus grand changement a été observé pour l'EC13 : alors qu'après l'éclaircie, seulement 15 % des pins rouges avaient les dimensions pour produire des billes de sciage (DHP ≥ 24,1 cm), ce pourcentage atteignait 90 % 25 ans plus tard. Qui plus est, 67 % des tiges dans ce traitement se trouvaient dans la classe de DHP de 30 à 46 cm. Seule une faible proportion des tiges (11 et 12 % pour l'EC23 et l'EC18, respectivement) était présente dans la classe de DHP ≥ 46,1 cm (dimensions pour la classe de qualité G), 25 ans après l'éclaircie.

2.1.5 Volume marchand brut du pin rouge

Après 25 ans, le VMB en pin rouge était de 262, 151 et 101 m³·ha⁻¹ pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13, respectivement (tableau 2). Comme pour la surface terrière, le VMB en pin rouge était plus grand 25 ans après l'éclaircie qu'avant celle-ci, avec des écarts variant de 56 à 67 m³·ha⁻¹ selon le traitement, soit de 35, 62 et 125 % du VMB avant l'éclaircie pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13, respectivement.

2.2 Croissance en diamètre du pin rouge et du pin blanc

2.2.1 Accroissement du DHP

Chez le pin rouge, la moyenne de l'accroissement en diamètre sur 25 ans a atteint un maximum dès la classe de DHP de 19 cm pour l'EC13 (moyenne de 13 cm) et l'EC18 (moyenne de 10 cm), mais seulement à la classe de 27 cm pour l'EC23 (moyenne de 8 cm; figure 5a). Après ce maximum, l'accroissement s'est maintenu pour plusieurs classes de DHP, puis a diminué pour atteindre une même valeur moyenne d'environ 6,5 cm à la classe de DHP de 43 cm pour l'EC18 et l'EC23. Chez les pins blancs, l'accroissement en diamètre a augmenté selon le DHP pour l'EC18 et l'EC23, et ne semble pas avoir atteint un maximum, puisque les accroissements les plus grands ont été observés chez les plus gros pins blancs (classe de DHP de 47 cm : moyenne de 14 cm; figure 5a). La moyenne de l'accroissement du pin blanc a surpassé celle du pin rouge à partir

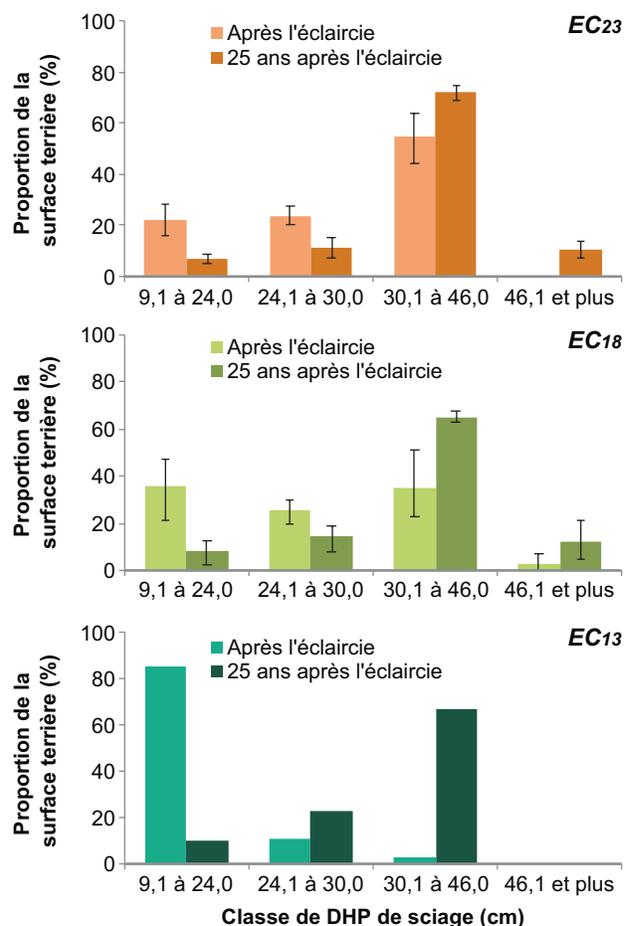


Figure 4. Répartition de la surface terrière en pin rouge après l'éclaircie et 25 ans plus tard, par classe de DHP de sciage, pour chacun des traitements. Les barres verticales indiquent l'étendue des valeurs des parcelles du traitement.

de la classe de DHP de 23 cm (EC18) et de 27 cm (EC23), et est devenue 2 fois plus grande à la classe de DHP de 47 cm. Le pin blanc est l'espèce qui a montré les plus grands accroissements en diamètre, dépassant même ceux du peuplier à grandes dents (annexe 6).

Chez le pin rouge, la moyenne de l'accroissement en diamètre par classe de DHP a été inversement proportionnelle à la surface terrière résiduelle après l'éclaircie (figure 5a). Entre l'EC18 et l'EC23, cette différence dans les accroissements a été observée jusqu'à la classe de DHP de 39 cm; elle était plus marquée chez les petits que chez les gros pins rouges (écart de 2,7 cm pour la classe de DHP de 19 cm et de 1,2 cm pour celle de 35 cm). Chez le pin blanc, un tel écart entre l'EC18 et l'EC23 n'a été observé que pour les petites classes de DHP (figure 5a).

Les plus forts accroissements individuels ont été observés chez les pins de DHP < 30 cm. Chez le pin rouge, l'accroissement en diamètre a atteint des valeurs de plus de 15 cm, mais sans jamais dépasser 19 cm, alors que chez le pin blanc, des accroissements de plus de 20 cm et même de 25 cm ont été observés (figure 5a).

2.2.2 Accroissement en surface terrière par arbre

Chez le pin rouge, contrairement à l'accroissement en diamètre, la moyenne de l'accroissement de la surface terrière par arbre a augmenté selon le DHP jusqu'à la classe de 39 cm pour l'EC18 et sans arrêt pour l'EC23, du moins jusqu'à la classe de DHP de 43 cm (figure 5b). Comme l'accroissement en diamètre, l'accroissement en surface terrière par arbre a été inversement proportionnel à la surface terrière résiduelle après l'éclaircie.

Chez le pin blanc, l'accroissement en surface terrière par arbre n'a cessé d'augmenter avec

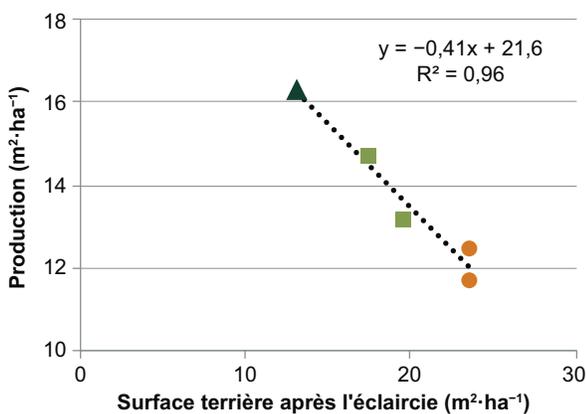
l'augmentation du DHP pour l'EC18 et l'EC23, comme pour l'accroissement en diamètre. Cependant, contrairement à celui-ci, le taux d'augmentation n'a pas diminué avec l'augmentation du DHP, du moins jusqu'à la classe de DHP de 47 cm (figure 5b). Pour cette classe de DHP, la moyenne de l'accroissement en surface terrière par arbre a été 2,5 fois plus élevée pour le pin blanc (12 dm²) que pour le pin rouge (5 dm²).

2.3 Production

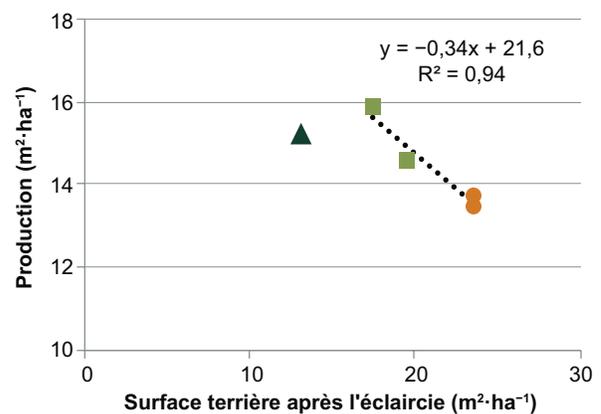
2.3.1 Toutes les espèces

Pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, la production nette de l'ensemble des espèces de DHP ≥ 9,1 cm a été inversement proportionnelle à la surface terrière après l'éclaircie (figure 6a). Elle a été en moyenne de 12,1 m²·ha⁻¹ (0,48 m²·ha⁻¹·an⁻¹) pour l'EC23, de 13,9 m²·ha⁻¹ (0,56 m²·ha⁻¹·an⁻¹) pour l'EC18 et de 16,3 m²·ha⁻¹ (0,65 m²·ha⁻¹·an⁻¹) pour l'EC13 (tableau 5).

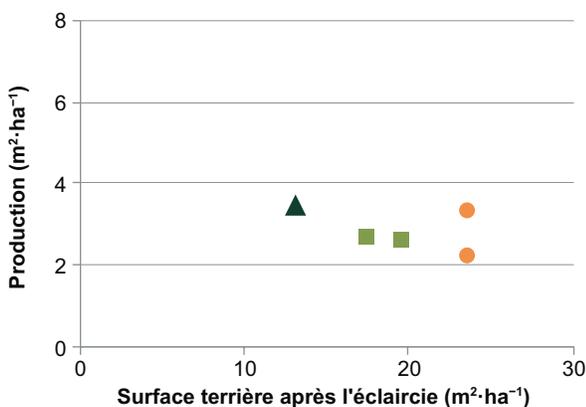
a) Production nette



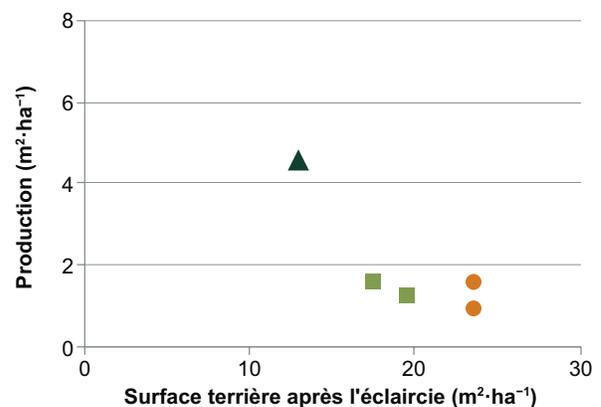
b) Accroissement des survivants



c) Mortalité



d) Recrutement



● EC23 ■ EC18 ▲ EC13

Figure 6. Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des arbres de DHP ≥ 9,1 cm pour l'ensemble des espèces, en fonction de la surface terrière totale après l'éclaircie : a) production nette; b) accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement.

Tableau 5. Surface terrière et bilan de production par traitement et parcelle avant, immédiatement après, et 25 ans après l'éclaircie, pour l'ensemble les arbres de DHP $\geq 9,1$ cm (toutes espèces confondues).

Traitement	Parcelle	Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)		Bilan de production* (m ² ·ha ⁻¹)					Production périodique annuelle nette (m ² ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	Taux de mortalité†	Contribution du REC à la PROD nette‡	
		Avant l'éclaircie	Après l'éclaircie	25 ans après l'éclaircie	ACC SURV	MORT	PROD interne	REC				PROD nette
	01	39,1	23,5	36,0	13,7	2,2	11,5	1,0	12,5	0,50	9 %	8 %
	03	37,6	23,5	35,2	13,5	3,4	10,1	1,6	11,7	0,47	14 %	14 %
	Moyenne	38,3	23,5	35,6	13,6	2,8	10,8	1,3	12,1	0,48	12 %	11 %
	02	36,1	17,4	32,1	15,8	2,7	13,1	1,6	14,7	0,59	16 %	11 %
	04	33,8	19,5	32,7	14,6	2,7	11,9	1,3	13,2	0,53	14 %	10 %
	Moyenne	34,9	18,4	32,4	15,2	2,7	12,5	1,4	13,9	0,56	15 %	10 %
	16	31,3	13,1	29,4	15,3	3,5	11,8	4,5	16,3	0,65	27 %	28 %

* ACC SURV = accroissement des arbres survivants; PROD interne = production interne (ACC SURV – MORT); REC = recrutement; PROD nette = production nette (ACC SURV + REC – MORT).

† MORT / surface terrière après l'éclaircie.

‡ REC / PROD nette.

C'est surtout la composante de production par accroissement des survivants qui explique la différence de production nette entre l'EC23 et l'EC18, puisque la mortalité et le recrutement ont été similaires (tableau 5). Toutefois, la mortalité a été environ 2 fois plus élevée que le recrutement, avec des taux de mortalité de 12 % (EC23) et de 15 % (EC18). Le recrutement a représenté de 10 à 11 % de la production nette pour ces 2 traitements (tableau 5).

L'EC13 diffère des 2 autres traitements à plusieurs égards. La production nette plus grande de ce traitement a reposé avant tout sur un recrutement 3 fois plus élevé ($4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) que pour les 2 autres (figure 6d). Malgré un taux de mortalité 2 fois plus élevé que pour les 2 autres traitements (27 %), la mortalité n'a été qu'un peu plus élevée (figure 6c), en raison de la surface terrière plus faible après l'éclaircie. Le recrutement a représenté 28 % de la production nette (tableau 5).

Pour l'EC23 et l'EC18, la production périodique annuelle nette a légèrement diminué dans la période allant de 11 à 25 ans comparativement à celle allant de 1 à 10 ans après l'éclaircie (figure 7a), alors que la mortalité et le recrutement ont légèrement augmenté (figure 7c et 7d). Pour l'EC13, la période allant de 11 à 25 ans a été plus productive que la période précédente, contrairement aux 2 autres traitements, car le recrutement a doublé (figure 7d) et la mortalité a diminué de 40 % (figure 7c).

2.3.2 Pin rouge

Les analyses de la production sont présentées séparément pour les pins rouges de dimension marchande ($\text{DHP} \geq 9,1 \text{ cm}$), de dimension sciage ($\text{DHP} \geq 24,1 \text{ cm}$) et de dimension poteau ($\text{DHP} \geq 32,1 \text{ cm}$). Ces classes sont inclusives, c'est-à-dire que la classe marchande comprend la classe de sciage et la classe de poteau; de même, la classe de sciage comprend la classe de poteau.

Comme il a été mentionné à la section 1.4.3.2 du *Matériel et méthodes*, les comparaisons entre les traitements pour le pin rouge se feront sur la base des droites de régression unissant la production à la proportion de la surface terrière en pin rouge après l'éclaircie. Le traitement EC13 est illustré dans les figures, mais il n'est pas systématiquement comparé avec les 2 autres traitements dans le texte, parce qu'il n'a été appliqué qu'à une seule parcelle et qu'il présente des particularités qui rendent difficile l'évaluation des différences attribuables à l'intensité de l'éclaircie.

2.3.2.1 Pins rouges de dimension marchande ($\text{DHP} \geq 9,1 \text{ cm}$)

Pour une même proportion de la surface terrière en pin rouge de dimension marchande après l'éclaircie, la production nette en surface terrière semble légèrement plus grande pour l'EC18 que pour l'EC23 (figure 8a). Par exemple, avec une proportion de 70 % en pin rouge après l'éclaircie, la production nette estimée par les droites de régression était respectivement de $10,5$ et de $9,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($0,42$ et $0,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$). Cette production nette résulte essentiellement de la production par accroissement des survivants, puisque la mortalité a été faible (de $0,1$ à $0,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ selon les parcelles, taux de mortalité de 1 à 5 %) et le recrutement, pratiquement nul (tableau 6).

Pour les pins rouges de dimension marchande, la production nette périodique annuelle de même que ses composantes (accroissement des survivants, mortalité, recrutement) ont diminué dans toutes les parcelles dans la période allant de 11 à 25 ans comparativement à celle allant de 1 à 10 ans après l'éclaircie (figure 7).

2.3.2.2 Pins rouges de dimension sciage ($\text{DHP} \geq 24,1 \text{ cm}$)

Dans toutes les parcelles, la production nette en surface terrière des pins rouges de dimension sciage a été plus grande que celle des pins rouges de dimension marchande, même si leur surface terrière après l'éclaircie était plus faible (tableau 6). La production accrue de ces arbres de dimension sciage est due à un recrutement beaucoup plus fort et, dans une moindre mesure, à une mortalité plus faible, ce qui a compensé pour une plus faible production par accroissement des survivants. Le recrutement a représenté en moyenne 40 % ($4,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), 60 % ($5,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) et 93 % ($8,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) de la production nette pour l'EC23, l'EC18 et l'EC13 respectivement.

La production nette dans les parcelles d'un même traitement a été variable (figure 9a); ces différences sont essentiellement dues au recrutement (figure 9d), puisque la production interne (c'est-à-dire la pente de la droite de régression de la production nette) est semblable pour l'EC18 et l'EC23 (figure 9a). En effet, la mortalité a été très faible (taux de mortalité de 0 à 5 %) pour l'ensemble des parcelles (figure 9c), et la production par accroissement des survivants a été semblable (figure 9b). En tout et pour tout, cela signifie que pour un même recrutement, la production nette serait semblable pour l'EC18 et l'EC23.

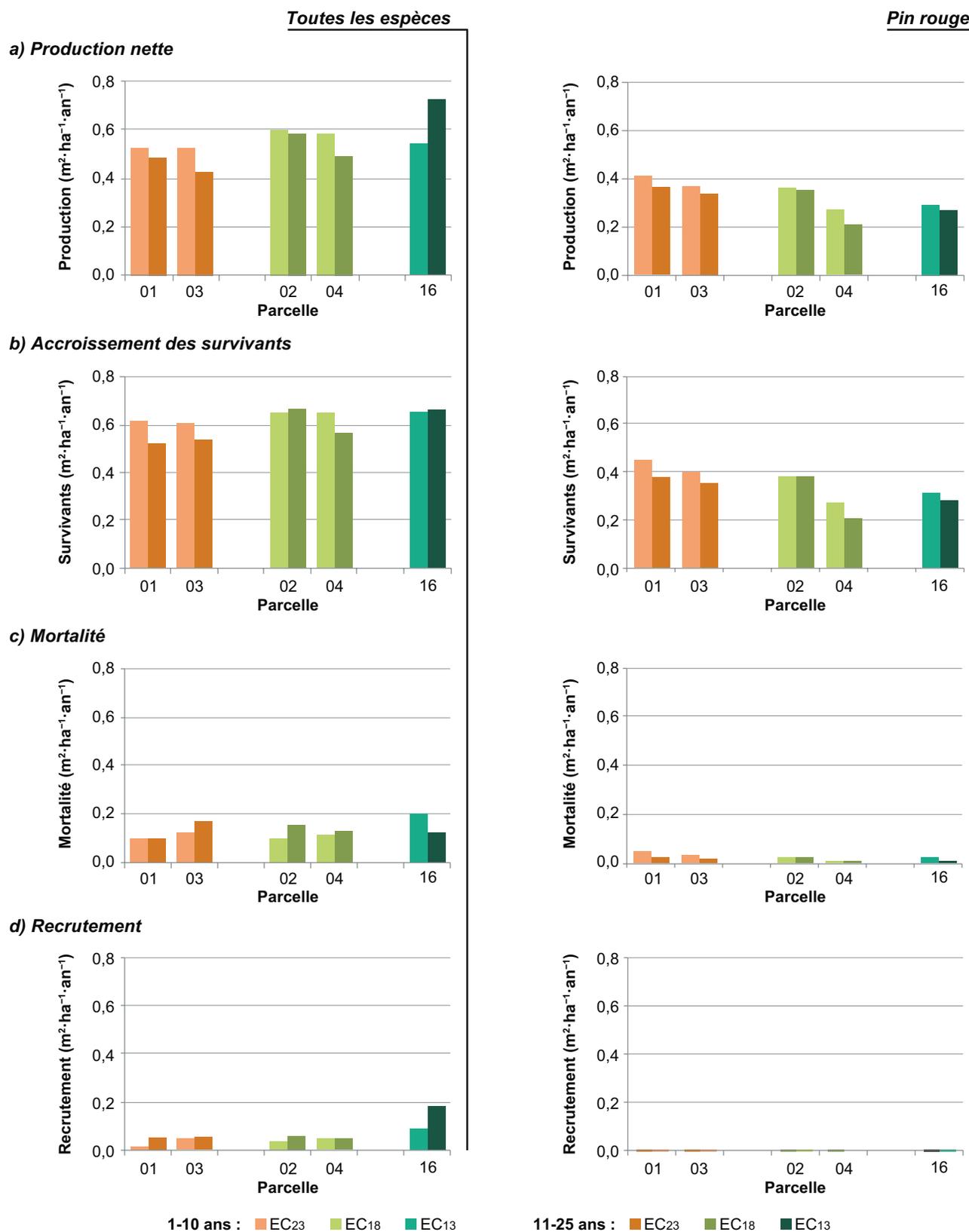
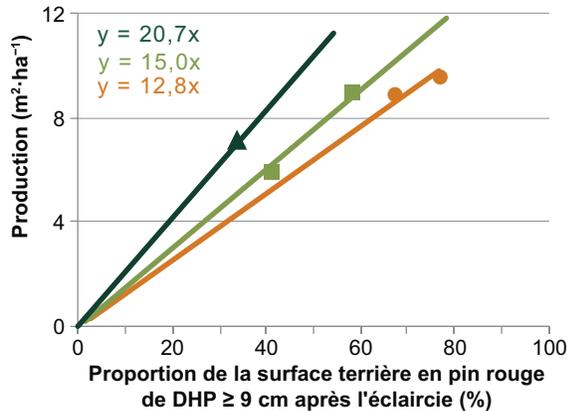
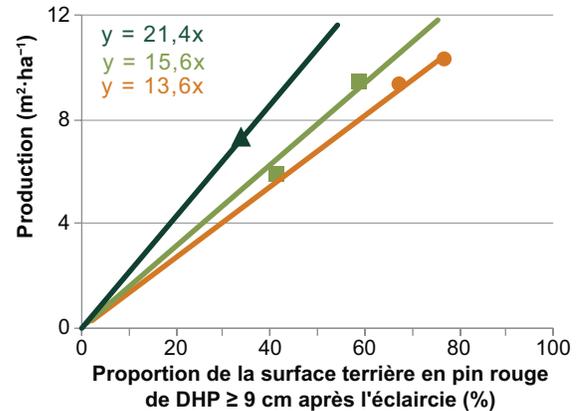


Figure 7. Production périodique annuelle par parcelle des arbres de DHP $\geq 9,1$ cm, pour l'ensemble des espèces et pour le pin rouge, pendant les périodes allant de 1 à 10 ans (couleurs claires) et de 11 à 25 ans (couleurs foncées) après l'éclaircie : a) production nette; b) accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement.

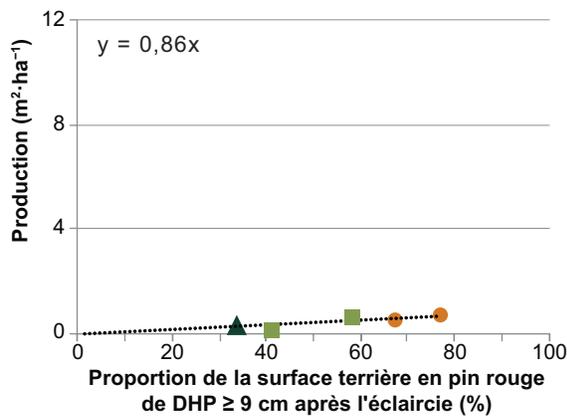
a) Production nette



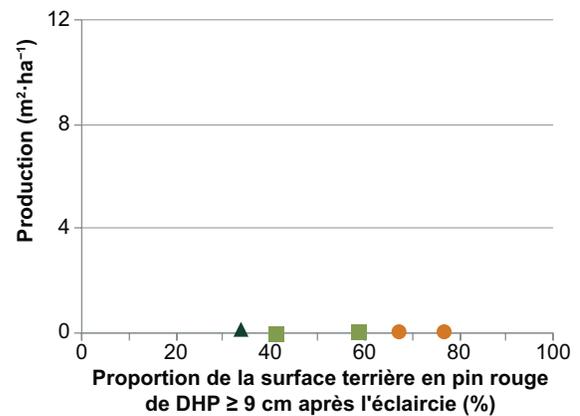
b) Accroissement des survivants



c) Mortalité



d) Recrutement



● EC23 ■ EC18 ▲ EC13

Figure 8. Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des pins rouges de DHP $\geq 9,1$ cm en fonction de la proportion de la surface terrière en pin rouge après l'éclaircie : a) production nette; b) production par accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement. Les droites de régression ont été forcées de passer par l'origine. Pour la mortalité, une seule droite de régression est tracée pour l'ensemble des parcelles, puisque les droites de régression des 3 traitements étaient similaires.

Les différences entre les traitements quant au recrutement ne sont pas dues principalement à l'intensité de l'éclaircie, mais plutôt à la quantité de pins rouges dans les classes de DHP de 9 à 24 cm (qui servent de réservoir pour le recrutement) dans les parcelles. En effet, pour une même proportion de la surface terrière de ces pins rouges après l'éclaircie, le recrutement a été semblable pour l'EC23 et l'EC18 (figure 9e). Cette observation porte à croire que la production nette de ces 2 traitements aurait peu différencié si toutes les parcelles avaient eu les mêmes proportions de pin rouge de DHP < 24 cm et de DHP ≥ 24 cm après l'éclaircie.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons estimé la production nette pour des mêmes proportions initiales en pins rouges de DHP < 24 cm et

pour une même distribution diamétrale relative de ces pins. Les équations linéaires résultantes, dans lesquelles le premier terme correspond au recrutement et le deuxième terme correspond à la production interne, ont été les suivantes :

$$(EC23) \text{ PROD}_{\text{nette}} = 27,5xy + 12,0(1-x)y$$

$$(EC18) \text{ PROD}_{\text{nette}} = 31,0xy + 11,8(1-x)y$$

où

x représente la proportion des pins rouges qui ont un DHP $< 24,1$ cm après l'éclaircie, calculée comme le rapport de la surface terrière des pins rouges ayant un DHP de 9,1 à 24,0 cm après l'éclaircie sur celle des pins rouges de DHP $\geq 9,1$ cm après l'éclaircie;

Tableau 6. Surface terrière par traitement et par parcelle avant, immédiatement après, et 25 ans après l'éclaircie, et bilan de production pour différentes classes de DHP de pin rouge.

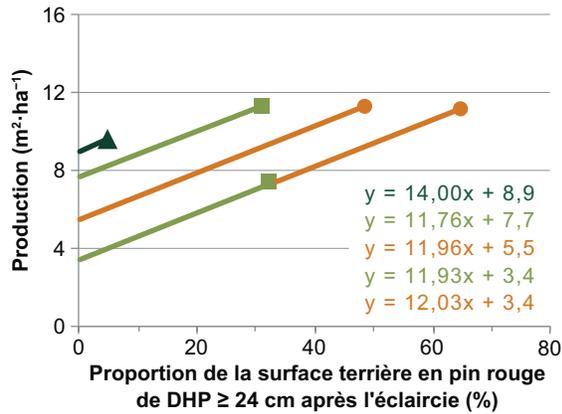
Classe de DHP	Traitement	Parcelle	Surface terrière (m ² .ha ⁻¹)			Bilan de production* (m ² .ha ⁻¹)					Production périodique annuelle nette (m ² .ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Taux de mortalité†	Contribution du recrutement à la production nette‡
			Avant l'éclaircie	Après l'éclaircie	25 ans après l'éclaircie	ACC SURV	MORT	PROD interne	REC	PROD nette			
Marchand (DHP ≥ 9,1 cm)	EC23	01	23,6	18,0	27,6	10,3	0,8	9,5	0,07	9,6	0,38	4 %	1 %
		03	18,8	15,8	24,7	9,4	0,5	8,9	0,05	8,9	0,36	3 %	1 %
		Moyenne	21,2	16,9	26,2	9,8	0,7	9,2	0,06	9,2	0,37	4 %	1 %
EC18	02	12,1	10,2	19,2	9,5	0,6	8,9	0,08	9,0	0,36	5 %	1 %	
	04	9,1	8,0	13,9	6,0	0,1	5,9	0,01	5,9	0,24	1 %	0 %	
	Moyenne	10,6	9,1	16,6	7,7	0,3	7,4	0,04	7,4	0,30	4 %	1 %	
EC13	16	5,7	4,5	11,5	7,3	0,3	7,0	0,10	7,1	0,28	7 %	1 %	
	01	20,1	15,1	26,3	8,1	0,4	7,8	3,4	11,1	0,45	2 %	30 %	
	03	13,9	11,3	22,6	6,0	0,2	5,8	5,5	11,2	0,45	2 %	49 %	
Moyenne	17,0	13,2	24,4	7,1	0,3	6,8	4,4	11,2	0,45	2 %	40 %		
Sciage (DHP ≥ 24,1 cm)	EC18	02	6,5	5,4	16,7	3,9	0,2	3,6	7,7	11,3	0,45	5 %	68 %
		04	7,2	6,3	13,6	3,9	0	3,9	3,4	7,3	0,29	0 %	47 %
		Moyenne	6,9	5,8	15,1	3,9	0,1	3,8	5,5	9,3	0,37	2 %	60 %
EC13	16	1,5	0,7	10,3	0,7	0	0,7	8,9	9,6	0,39	0 %	93 %	
	01	11,5	8,9	23,2	4,1	0	4,1	10,2	14,3	0,57	0 %	71 %	
	03	6,6	5,5	17,2	2,4	0,1	2,4	9,4	11,7	0,47	2 %	80 %	
Moyenne	9,1	7,2	20,2	3,3	0,0	3,2	9,8	13,0	0,52	1 %	75 %		
Poteau (DHP ≥ 32,1 cm)	EC18	02	1,7	1,3	10,9	0,7	0,2	0,5	9,1	9,6	0,38	13 %	95 %
		04	4,5	3,8	11,4	1,8	0	1,8	5,9	7,7	0,31	0 %	77 %
		Moyenne	3,1	2,6	11,2	1,2	0,1	1,1	7,5	8,6	0,34	3 %	87 %
EC13	16	0,8	0,0	6,4	0	0	0	6,4	6,4	0,26	—	100 %	

* ACC SURV = accroissement des arbres survivants; PROD interne = production interne (ACC SURV – MORT); REC = recrutement; PROD nette = production nette (ACC SURV + REC – MORT).

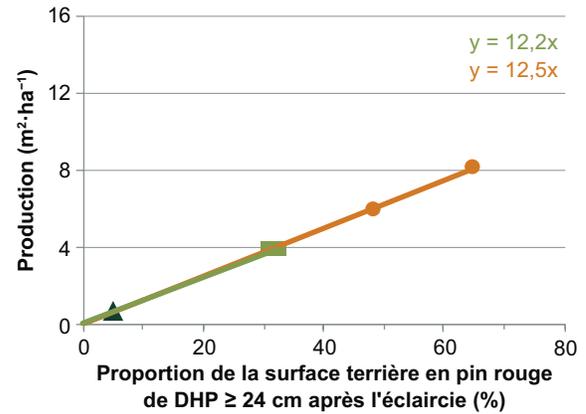
† MORT / surface terrière après l'éclaircie.

‡ REC / PROD nette.

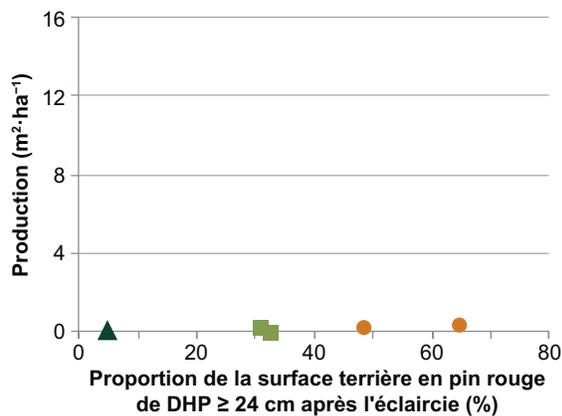
a) Production nette



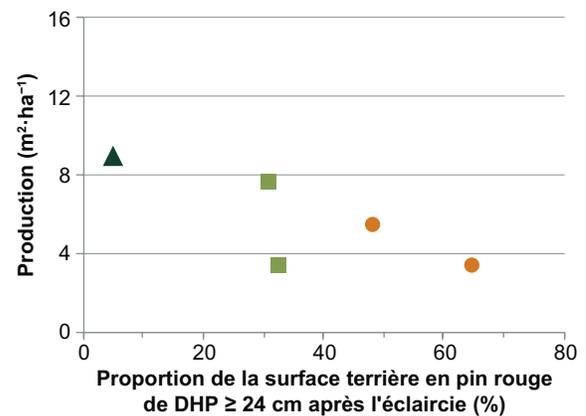
b) Accroissement des survivants



c) Mortalité



d) Recrutement



e) Recrutement

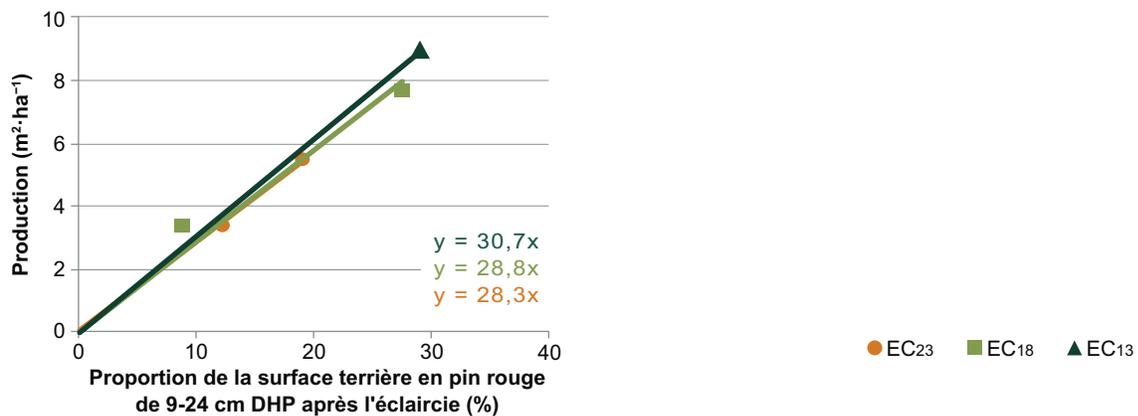


Figure 9. Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des pins rouges de dimension sciage (DHP ≥ 24,1 cm) en fonction de la proportion de leur surface terrière après l'éclaircie : a) production nette; b) production par accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement; e) recrutement en fonction de la proportion de la surface terrière en pin rouge de DHP de 9-24 cm après l'éclaircie. Les droites de régression ont été forcées de passer par l'origine, à l'exception du graphique a), dans lequel les ordonnées à l'origine correspondent aux valeurs du recrutement.

y correspond à la proportion de la surface terrière résiduelle après l'éclaircie du pin rouge, calculée comme le rapport entre la surface terrière des pins rouges de $DHP \geq 9,1$ cm après l'éclaircie sur la surface terrière résiduelle après l'éclaircie (18 ou $23 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, selon le traitement);

xy et $(1-x)y$ correspondent respectivement à la proportion de la surface terrière résiduelle après l'éclaircie composée de pins rouges de $DHP < 24,1$ cm et de $DHP \geq 24,1$ cm.

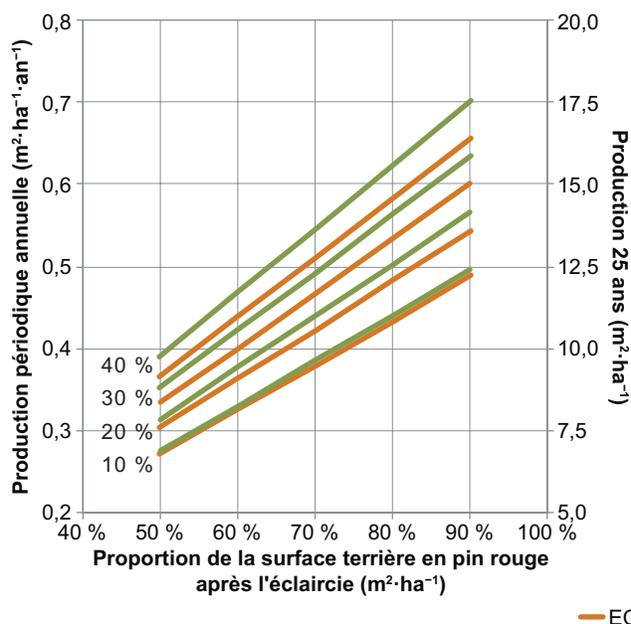
Le premier terme de ces équations indique que le recrutement dans le traitement EC_{18} dépasserait d'environ 10 % celui dans le traitement EC_{23} . Comme la production interne (2^e terme de l'équation) est semblable pour les 2 traitements, la production nette résultante serait légèrement à l'avantage de l' EC_{18} , et l'écart de production augmenterait selon la proportion de pins rouges de $DHP < 24$ cm. Ainsi, avec des proportions de la surface terrière en pin rouge de $DHP \geq 9,1$ cm après l'éclaircie (y) de 70 % et de 90 %, dont 30 % (x) en pins rouges de $DHP < 24$ cm, la production périodique annuelle nette en pin rouge de dimension sciage serait respectivement de 0,49 et de 0,63 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l' EC_{18} et de 0,47 et de 0,60 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l' EC_{23} (figure 10a). La production deviendrait semblable

pour ces 2 traitements si la proportion de pins rouges de $DHP < 24$ cm baissait à 10 %. Par ailleurs, avec 70 % de pin rouge, le temps requis pour produire $10 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ de pin rouge de dimension sciage passerait de 26 à environ 21 ans si la proportion de pins rouges de $DHP < 24$ cm après l'éclaircie augmentait de 10 à 30 % (figure 10b).

Le recrutement de pins rouges de dimension sciage a varié de 45 à 109 tiges- ha^{-1} selon les parcelles pour l' EC_{23} et l' EC_{18} , ce qui représente de 23 à 58 % du nombre de ces pins rouges 25 ans après l'éclaircie (tableau 7). Dans chaque classe de DHP, une plus grande proportion de pins rouges a été recrutée pour l' EC_{18} que pour l' EC_{23} , et ce sont dans les classes de DHP de 13 à 17 cm que les plus grands écarts ont été observés (figure 11a, partie gauche). Ainsi, dans la classe de DHP de 17 cm, le tiers des pins rouges de l' EC_{23} ont atteint ou dépassé le seuil de 24,1 cm après 25 ans, alors que cette proportion représente plus des deux tiers pour l' EC_{18} .

Compte tenu du fait que la surface terrière résiduelle était de 0,78 (18/23) fois plus petite pour l' EC_{18} que pour l' EC_{23} , le recrutement pour les plus petites classes de DHP (11 à 17 cm) serait plus grand pour l' EC_{18} (figure 11b, partie gauche). Pour

a) Production nette



b) Temps requis pour produire 10 m²·ha⁻¹

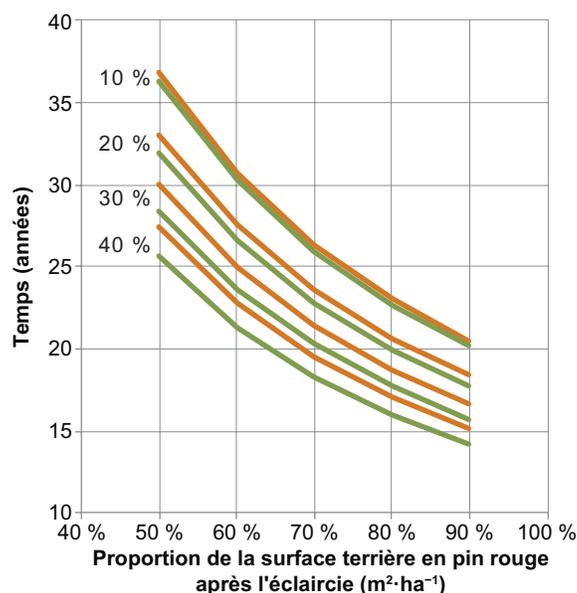


Figure 10. Estimation de la production en pin rouge de dimension sciage ($DHP \geq 24,1$ cm) pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie dans les traitements EC_{23} et EC_{18} , en fonction de la proportion de la surface terrière des pins rouges marchands ($DHP \geq 9,1$ cm) après l'éclaircie : a) production nette; b) temps requis pour produire $10 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ de pin rouge de dimension sciage. Les pourcentages à côté des courbes indiquent la proportion de la surface terrière représentée par les pins rouges de DHP de 9,1 à 24,0 cm par rapport à celle de l'ensemble des pins rouges ($DHP \geq 9,1$ cm) après l'éclaircie.

les classes de DHP de 19 et de 21 cm, le recrutement serait semblable pour les 2 traitements. Pour la classe de DHP de 23 cm, le recrutement serait plus fort pour l'EC23 que pour l'EC18.

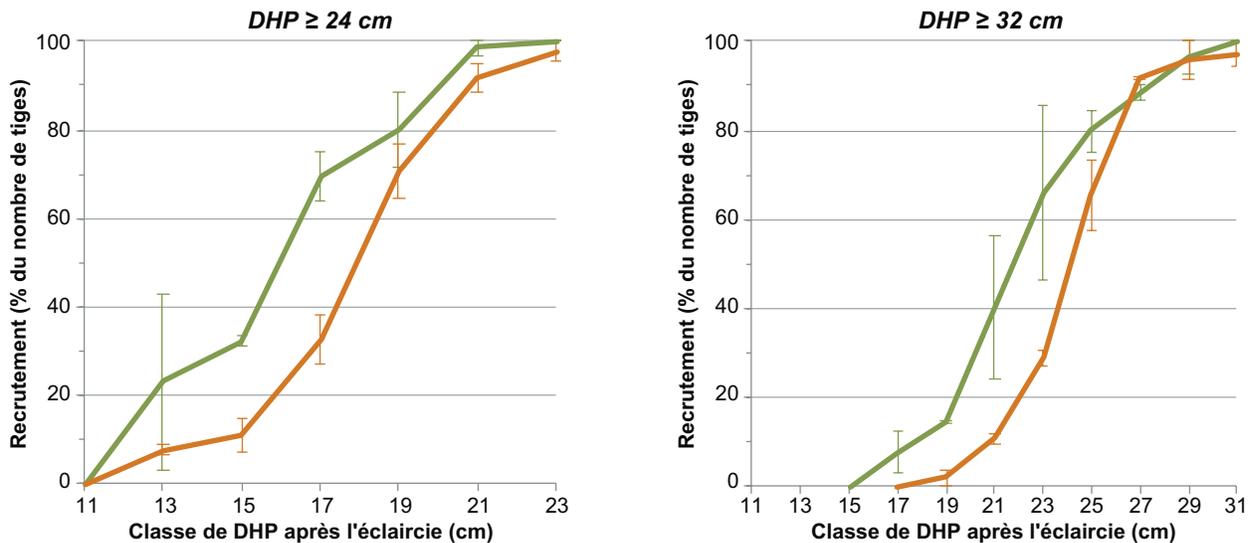
2.3.2.3 Pins rouges de dimension poteau (DHP ≥ 32,1 cm)

Tout comme ceux de dimension sciage, la production nette en surface terrière des pins rouges de dimension poteau a reposé en grande partie sur le recrutement (en moyenne, 75 % pour l'EC23,

87 % pour l'EC 18 et 100 % pour l'EC13; tableau 6). Celui-ci a été plus grand que pour les arbres de dimension sciage, sauf pour le traitement EC13.

La production nette en surface terrière des pins rouges de dimension poteau a été plus grande dans les parcelles de l'EC23 que dans celles de l'EC18, malgré des variations entre les parcelles (tableau 6, figure 12a). Cette production plus grande dans les parcelles de l'EC23 découle surtout du recrutement qui a été plus fort (figure 12d), mais aussi d'une

a) Recrutement en proportion du nombre de pins rouges après l'éclaircie, par classe de DHP



b) Recrutement en surface terrière par classe de DHP, ajusté relativement à la surface terrière de l'EC23

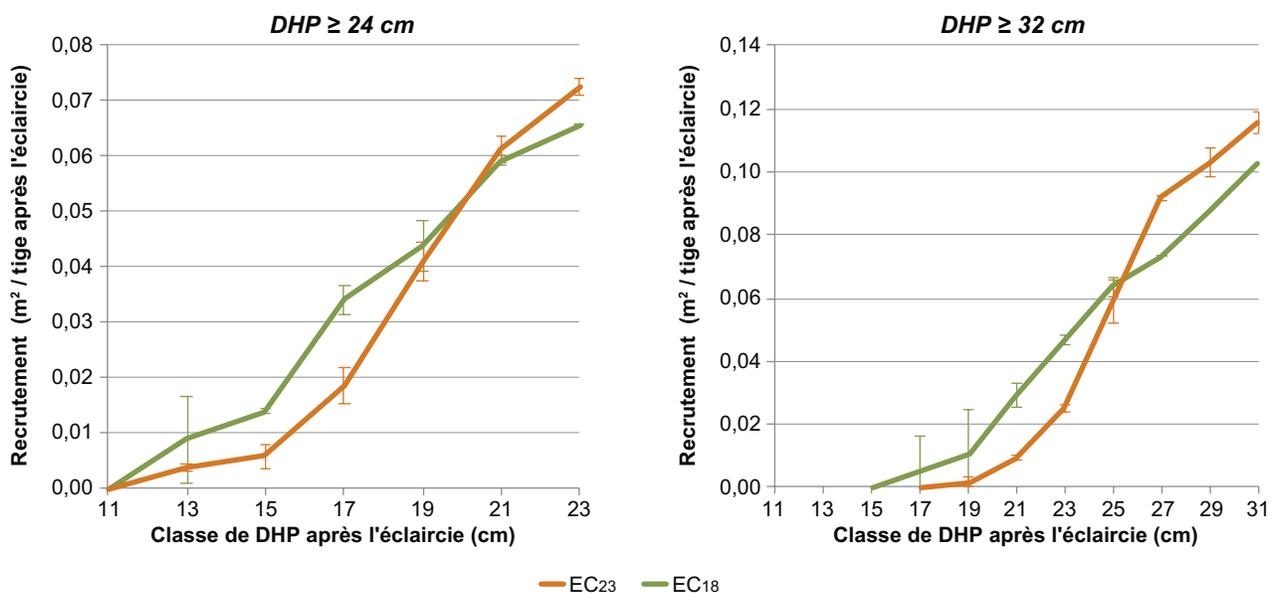


Figure 11. Recrutement en pin rouge de dimension de sciage (DHP ≥ 24 cm) et de dimension de poteau (DHP ≥ 32 cm), pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, dans les traitements EC23 et EC18 : a) proportion du nombre de pins rouges recrutés par classe de DHP après l'éclaircie; b) surface terrière recrutée par classe de DHP après l'éclaircie, par pin rouge, en considérant que pour chaque m² dans l'EC23, l'EC18 n'en a que 0,78 m² (18/23). Les barres verticales indiquent l'étendue des valeurs des parcelles du traitement.

Tableau 7. Nombre de tiges par traitement et par parcelle avant, immédiatement après, et 25 ans après l'éclaircie, et bilan de production pour différentes classes de DHP de pin rouge.

Classe de DHP	Traitement	Parcelle	Nombre de tiges·ha ⁻¹			Bilan de production* (nombre de tiges·ha ⁻¹)				Taux de mortalité†	Proportion de recrues‡
			Avant l'éclaircie	Après l'éclaircie	25 ans après l'éclaircie	SURV	MORT	REC	PROD nette		
Marchand (DHP ≥ 9,1 cm)	EC23	01	406	312	287	278	34	9	-25	11 %	3 %
		03	392	335	314	308	27	6	-21	8 %	2 %
		Moyenne	399	324	301	293	31	8	-23	9 %	2 %
	EC18	02	358	294	277	269	25	8	-17	9 %	3 %
		04	155	136	130	129	7	1	-6	5 %	1 %
	Moyenne	257	215	204	199	16	5	-12	7 %	2 %	
Sciage (DHP ≥ 24,1 cm)	EC13	16	234	190	174	166	24	8	-16	13 %	5 %
		01	244	182	228	176	6	52	46	3 %	23 %
		03	182	150	232	147	3	85	82	2 %	37 %
		Moyenne	213	166	230	162	5	69	64	3 %	30 %
	EC18	02	98	81	187	78	3	109	106	4 %	58 %
04		83	73	118	73	0	45	45	0 %	38 %	
	Moyenne	91	77	153	76	2	77	76	2 %	50 %	
Poteau (DHP ≥ 32,1 cm)	EC13	16	18	12	128	12	0	116	116	0 %	91 %
		01	111	85	179	85	0	94	94	0 %	53 %
		03	65	54	146	53	1	93	92	2 %	64 %
		Moyenne	88	70	163	69	1	94	93	1 %	58 %
	EC18	02	16	13	98	11	2	87	85	15 %	89 %
04		38	32	86	32	0	54	54	0 %	63 %	
	Moyenne	27	23	92	22	1	71	70	4 %	77 %	
EC13	16	6	0	66	—	—	66	66	—	100 %	

* SURV = arbres survivants; REC = recrutement; PROD nette = production nette (REC – MORT).

† MORT / nombre de tiges après l'éclaircie.

‡ REC / nombre de tiges 25 ans après l'éclaircie.

plus grande production par accroissement des survivants (figure 12b). La mortalité a été nulle ou presque dans toutes les parcelles (figure 12c).

Le recrutement plus grand dans les parcelles de l'EC23 semble relié à une plus grande proportion de pins rouges de DHP < 32 cm ayant servi de réservoir pour le recrutement, et non au traitement lui-même. En effet, d'une part, le recrutement issu de la classe de DHP de 24-32 cm a été plus important pour l'EC23 que pour l'EC18 (figure 12e), mais d'autre part, celui issu de la classe de DHP de 9-24 cm a été plus faible (figure 12f). Il en résulte que le recrutement total en pins rouges de dimension poteau serait assez semblable pour l'EC23 et l'EC18.

Comme la proportion et la distribution diamétrale des pins de DHP < 32 cm peuvent influencer le recrutement, la production nette a été estimée pour de mêmes proportions initiales de la surface terrière en pins rouges de DHP < 32 cm et pour une même distribution diamétrale relative de ces pins. Les équations linéaires résultantes, dans lesquelles le premier terme correspond au recrutement et le deuxième terme correspond à la production interne, ont été les suivantes :

$$(EC23) \text{ PROD}_{\text{nette}} = 21,5xy + 10,5(1-x)y$$

$$(EC18) \text{ PROD}_{\text{nette}} = 22,5xy + 8,0(1-x)y$$

où

x représente la proportion des pins rouges qui ont un DHP < 32,1 cm, soit la surface terrière des pins rouges de 9,1 à 32,0 cm après l'éclaircie divisée par celle des pins rouges de DHP \geq 9,1 cm après l'éclaircie);

y est la proportion de la surface terrière en pin rouge, soit la surface terrière des pins rouges de DHP \geq 9,1 cm après l'éclaircie divisée par la surface terrière résiduelle après l'éclaircie (18 ou 23 m²·ha⁻¹);

les termes xy et $(1-x)y$ correspondent respectivement à la proportion de la surface terrière résiduelle après l'éclaircie composée de pins rouges de DHP < 32,1 cm et de DHP \geq 32,1 cm.

Ces estimations révèlent que le recrutement pour l'EC23 serait environ 5 % plus faible que pour l'EC18. Par contre, la production interne pour l'EC23 serait un peu plus forte que pour l'EC18. La production nette résultante serait légèrement à l'avantage du traitement EC23, en particulier lorsque la proportion de pins de DHP < 32 cm est faible. Dans l'équation

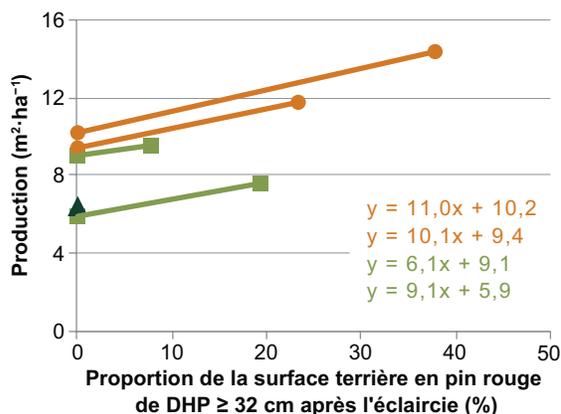
du traitement EC18, la valeur de 8,0 a été retenue, soit la pente moyenne des droites de régression des 2 parcelles, pour le facteur correspondant à la production interne. Il est toutefois possible que cette valeur soit plus près de 9,1 (soit la valeur pour la parcelle 02; figure 12a), puisque la pente de 6,1 de l'autre parcelle (04) est probablement imprécise en raison du très faible nombre de pins rouges de DHP \geq 32 cm dans celle-ci (8 % de la surface terrière totale); L'écart estimé entre l'EC18 et l'EC23 pourrait donc être moindre.

Selon les équations, la production périodique annuelle nette des pins rouges de dimension poteau serait de 0,45 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour l'EC23 et de 0,43 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour l'EC18, pour une proportion de 70 % de la surface terrière en pins rouges de DHP \geq 9 cm après l'éclaircie, dont 50 % en pins rouges de DHP < 32 cm. Par contraste, cette production serait semblable pour les 2 traitements (0,53 m²·ha⁻¹·an⁻¹) si la proportion de pins rouges de DHP < 32 cm augmentait à 75 %. Pour une proportion de 70 % de la surface terrière en pins rouges de DHP \geq 9 cm après l'éclaircie, le temps requis pour produire 10 m²·ha⁻¹ de pins rouges de dimension poteau diminuerait de 23 à 19 ans si la proportion de pins rouges de DHP < 32 cm passait de 50 à 75 %.

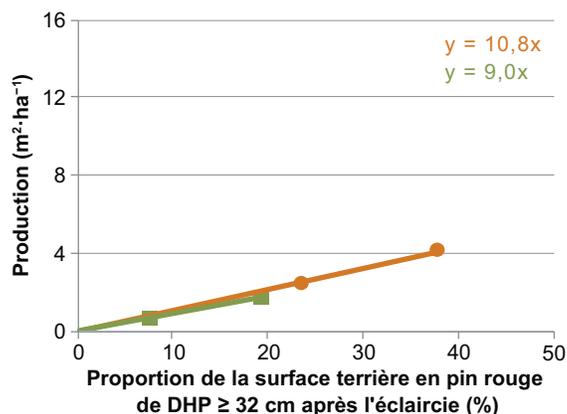
Le recrutement dans la classe de DHP de dimension poteau a varié de 54 à 94 tiges·ha⁻¹ pour les parcelles de l'EC23 et de l'EC18, ce qui représente de 53 à 89 % du nombre de ces pins rouges 25 ans après l'éclaircie (tableau 7). Dans les classes de DHP de 17 à 25 cm, une plus grande proportion de pins rouges a été recrutée dans les parcelles de l'EC18 que dans celles de l'EC23, et ce sont dans les classes de DHP de 21 et 23 cm que les plus grandes différences ont été observés (figure 11a, partie droite). Par exemple, dans les parcelles de l'EC23, un peu moins du tiers des pins rouges de la classe de DHP de 23 cm ont atteint ou dépassé le seuil de 32,1 cm après 25 ans, alors que cette proportion représente les deux tiers dans les parcelles de l'EC18.

Compte tenu du fait que la surface terrière résiduelle était de 0,78 (18/23) fois plus petite pour l'EC18 que pour l'EC23, le recrutement pour les petites classes de DHP (15 à 23 cm) serait plus grand pour l'EC18 (figure 11b, partie droite). Pour la classe de DHP de 25 cm, le recrutement serait semblable pour les 2 traitements. Pour les classes de DHP de 27 à 31 cm, le recrutement serait plus fort pour l'EC23 que pour l'EC18.

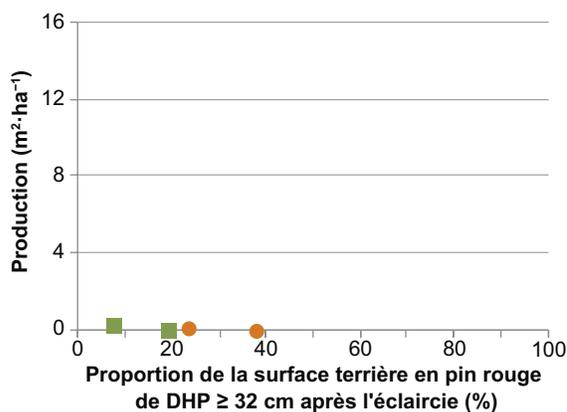
a) Production nette



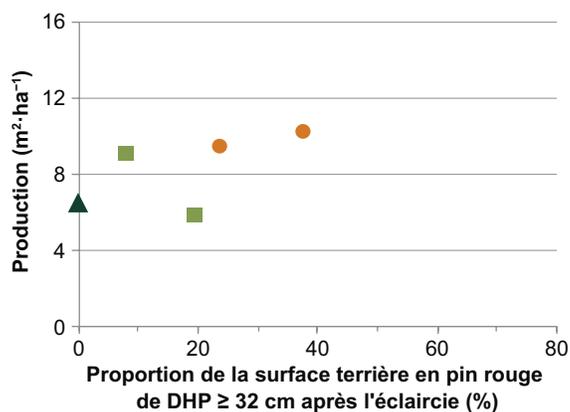
b) Accroissement des survivants



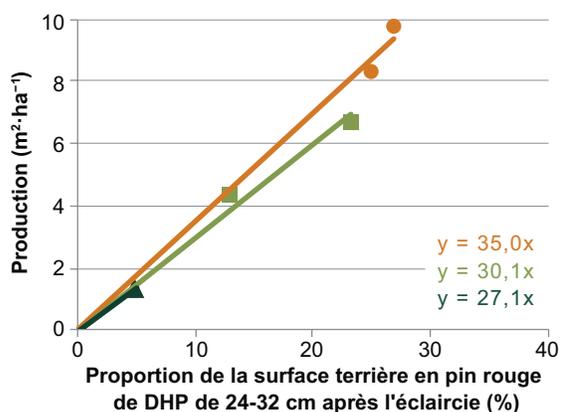
c) Mortalité



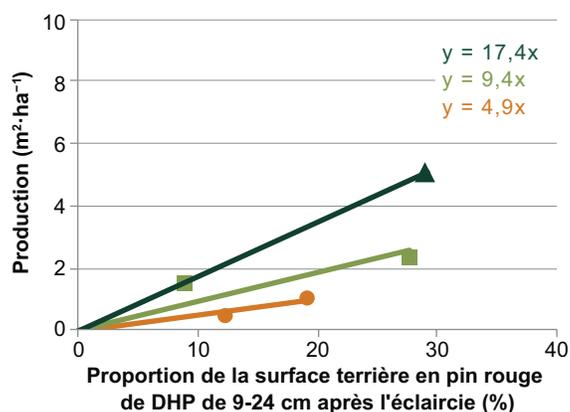
d) Recrutement



e) Recrutement



f) Recrutement



● EC23 ■ EC18 ▲ EC13

Figure 12. Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant l'éclaircie, des pins rouges de dimension poteau (DHP $\geq 32,1$ cm) en fonction de la proportion de leur surface terrière après l'éclaircie : a) production nette; b) production par accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement; e) recrutement en fonction de la proportion de la surface terrière en pin rouge de 24-32 cm de DHP et f) recrutement en fonction de la proportion de la surface terrière en pin rouge de 9-24 cm de DHP.

2.3.2.4 Productivité des pins rouges selon leur grosseur

Le taux de production des pins rouges en fonction de leur DHP après l'éclaircie permet de connaître la productivité selon leur grosseur, c'est-à-dire la production (en m²) obtenue après 25 ans par m² de surface terrière après l'éclaircie. Les taux de production sont présentés pour la production interne et ses 2 composantes, l'accroissement des survivants et la mortalité. La production interne a été préférée à la production nette (production interne à laquelle on additionne le recrutement et dont on soustrait le transfert de classe de DHP) afin de mieux cerner la production générée directement par les pins rouges de la classe de DHP concernée.

Le plus haut taux de production par accroissement des pins rouges survivants a été mesuré pour l'EC13, avec des valeurs décroissantes pour l'EC18 et l'EC23 (figure 13a). Pour l'EC13, ce taux a été maximal dès la classe de DHP de 11 cm, puis il a diminué continuellement avec l'augmentation de la grosseur. Par contraste, pour les 2 autres traitements, une diminution graduelle ne s'est amorcée qu'à partir de la classe de DHP de 19 cm. Plus la surface terrière après l'éclaircie du traitement était faible, plus la valeur maximale de la productivité après 25 ans a été élevée (2,4 m² par m² de surface terrière en pin rouge pour l'EC13, 1,4 m² par m² pour l'EC18 et 0,9 m² par m² pour l'EC23). La différence entre l'EC18 et l'EC23 s'est estompée avec l'augmentation de la classe de DHP, jusqu'à un minimum assez constant (de 0,1 à 0,3) à partir de la classe de DHP de 27 cm.

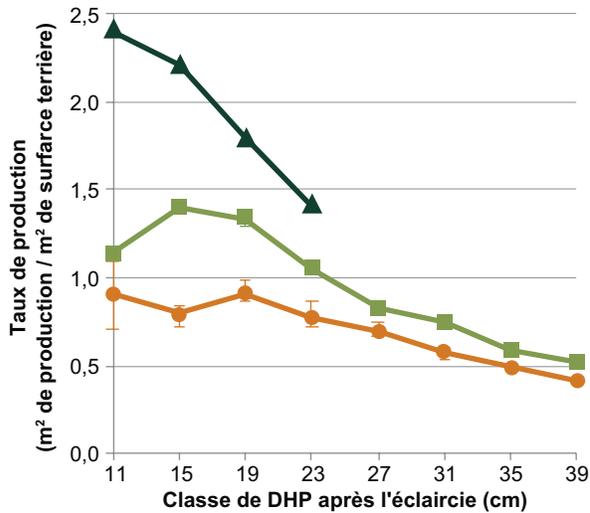
Quoiqu'il ait été assez semblable pour tous les traitements, le taux de mortalité par classe de DHP a été légèrement plus élevé pour le traitement EC23 (figure 13b). Pour tous les traitements, ce taux a diminué rapidement avec l'augmentation du DHP : en moyenne, de 0,25 à 0,38 m² par m² de surface terrière en pin rouge après l'éclaircie pour la classe

de DHP de 11 cm, jusqu'à des valeurs nulles ou presque à la classe de DHP de 23 cm (figure 13b). Pour les classes de plus gros DHP, le taux de mortalité s'est maintenu en moyenne entre 0 et 0,07 m² par m² de surface terrière en pin rouge après l'éclaircie.

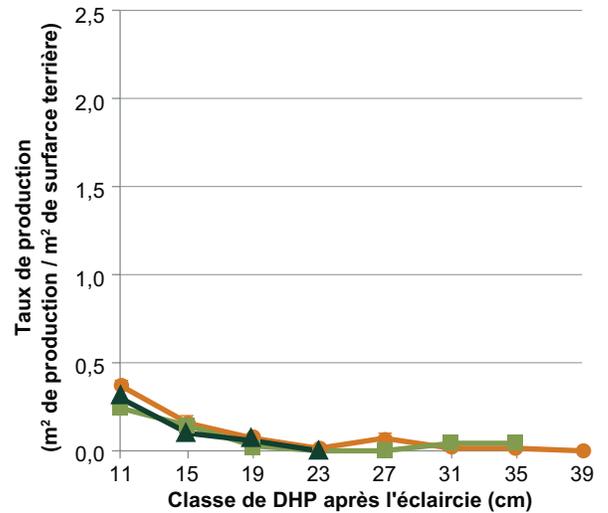
Comme pour le taux de production par accroissement des survivants, celui de la production interne a été le plus élevé pour l'EC13, suivi de l'EC18 et de l'EC23 (figure 13c). Cependant, il a atteint de plus faibles valeurs dans les classes de plus petits DHP, à cause de la composante de la mortalité. Le taux de production interne a culminé à la classe de DHP de 15 cm (EC13) ou de 19 cm (maximums respectifs de 1,3 et 0,8 m² par m² de surface terrière en pin rouge pour l'EC18 et l'EC23), puis il a diminué avec l'augmentation de la classe de DHP. Cette diminution a été plus rapide pour l'EC18 que pour l'EC23, de sorte qu'à la classe de DHP de 35 cm, l'écart était pratiquement nul, avec une valeur de 0,5 m² par m² de surface terrière en pin rouge pour les 2 traitements.

Puisque les traitements présentent des surfaces terrières résiduelles différentes et que le taux de production est calculé par m² de surface terrière résiduelle, les différences de production interne entre les traitements différeront de celles basées sur les taux. En effet, pour chaque m² de surface terrière résiduelle du traitement EC23, les traitements EC18 et EC13 ne présentent respectivement, en proportion, qu'une surface terrière de 0,78 (18/23) et de 0,57 (13/23) m². En tenant compte de ces différences, le taux de production interne de l'EC18 a été plus élevé que celui de l'EC23 pour les petits pins rouges (figure 13d). Cet écart a diminué chez les pins de grosseur moyenne. Finalement, à partir de la classe de DHP de 35 cm, le taux de production pour l'EC23 a dépassé celui pour l'EC18. Par rapport à l'EC13, la production interne de l'EC18 surpasse celle de l'EC13 à partir de la classe de DHP de 19 cm.

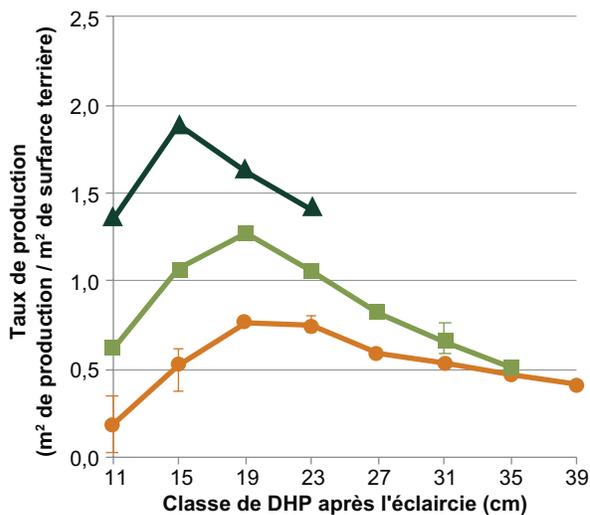
a) *Accroissement des survivants*



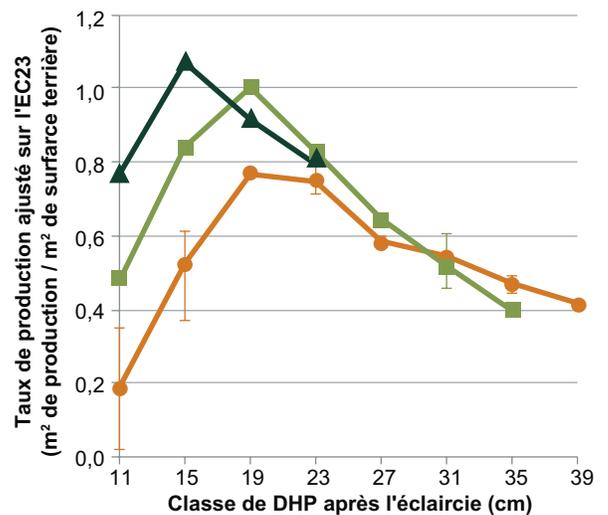
b) *Mortalité*



c) *Production interne*



d) *Production interne ajustée*



● EC23 ■ EC18 ▲ EC13

Figure 13. Taux de production du pin rouge (m² de production 25 ans après l'éclaircie par m² de surface terre après l'éclaircie), par classe de DHP après l'éclaircie et par traitement : a) production par accroissement des survivants; b) mortalité; c) production interne; d) production interne ajustée relativement à la surface terre résiduelle de l'EC23. Le taux de production brut de la production par accroissement des survivants est basé sur la surface terre après l'éclaircie des survivants. Les barres d'erreur indiquent l'écart des valeurs des parcelles du traitement par rapport à leur moyenne. Lorsque celles-ci sont absentes, c'est que le nombre de tiges était trop faible pour faire un calcul valable dans l'une des parcelles pour la classe de DHP en question.

Chapitre 3 – Discussion

3.1 Comparaisons entre les traitements

Dans cette étude, il est difficile de distinguer clairement les différences dues aux traitements de celles dues à d'autres variables. Les traitements d'éclaircie sont basés sur un gradient dans la surface terrière résiduelle obtenue après l'éclaircie : 23,5 m²·ha⁻¹ pour l'EC₂₃, 18,4 m²·ha⁻¹ pour l'EC₁₈ et 13,1 m²·ha⁻¹ pour l'EC₁₃ (tableau 2). Une autre variable était cependant associée à ce gradient, soit la proportion de la surface terrière en pin rouge avant et après l'éclaircie. Celle-ci a diminué en même temps que la surface terrière résiduelle des traitements d'éclaircie (figure 1). Par conséquent, les traitements sont associés à ces 2 variables, et non seulement à celle de la surface terrière résiduelle après l'éclaircie. Pour tenter de pallier ce problème, les traitements ont été comparés sur la base d'une même proportion de pins rouges, par l'utilisation de droites de régression. Cela a permis de comparer la production en fonction de la proportion de pins rouges plutôt que par la moyenne de la production des parcelles d'un traitement. Toutefois, il n'est pas certain que cette relation entre la production et la proportion de pins rouges soit linéaire, d'autant plus que chacun des traitements ne comportait qu'une ou 2 parcelles.

Une autre variable est venue influencer la production des pins rouges de dimension sciage (et de dimension poteau), soit la quantité de pins rouges de plus petites dimensions qui ont servi de réservoir pour le recrutement. Comme le recrutement a contribué grandement au rendement de ces pins (tableau 6), leur abondance dans chacune des parcelles a influencé le rendement, et ce, indépendamment du traitement.

Pour l'EC₁₃, il semble probable que les plus forts accroissements en diamètre des pins rouges, pour chaque classe de DHP, ne résultent pas seulement d'une plus faible surface terrière résiduelle. En effet, le couvert forestier après l'éclaircie de la parcelle 16 était formé de pins rouges de plus petits diamètres que celui des parcelles des 2 autres traitements (tableau 4). Par conséquent, pour une même classe de DHP, les pins rouges du traitement EC₁₃ recevaient davantage de lumière, non seulement à cause d'une surface terrière plus faible, mais aussi parce que le peuplement avait une structure diamétrale différente.

3.2 Évolution de la composition des pinèdes à la suite des éclaircies

Les changements dans la composition des espèces du couvert, des recrues et des gaules sur une période de 25 ans permettent de percevoir la dynamique des espèces à la suite des éclaircies et l'évolution de ces peuplements de plus de 80 ans, poussant sur des dépôts sableux, dans le sous-domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest. Le couvert dominant (soit les 100 plus grosses tiges à l'hectare) a évolué vers un couvert composé presque exclusivement de pins rouges et de pins blancs, à l'exception de quelques peupliers âgés qui mourront prochainement (tableau 4). L'ouverture du couvert a grandement favorisé le recrutement de tiges marchandes de sapin baumier et d'érable rouge; le peuplier à grandes dents a aussi été favorisé lorsque la surface terrière résiduelle a été abaissée à 13 m²·ha⁻¹ (figure 2). Plusieurs pins blancs de dimension marchande ont été recrutés dans chacune des parcelles, et quelques centaines de gaules de cette espèce se sont développées en 25 ans dans les parcelles de l'EC₂₃. Pour le pin rouge, le recrutement de tiges marchandes a été absent, et seulement quelques gaules de cette espèce subsistent dans chacune des parcelles après 25 ans (annexe 5). Le pin blanc est une espèce plus tolérante à l'ombre que le pin rouge, et sa croissance en diamètre a été plus forte. À partir d'un DHP d'environ 25 cm, cette croissance a continuellement augmenté avec la classe de DHP pour le pin blanc, mais pas pour le pin rouge (figure 5a). Sur les stations bien drainées, le pin blanc peut s'installer naturellement dans les pinèdes à pin rouge (Logan 1950, Peck et Zenner 2009, Spurr et Allison 1956), et les peuplements peuvent évoluer vers des pinèdes à pin blanc (Horton et Brown 1960, Shugart *et al.* 1973). Sans autre intervention, ces pinèdes à pin rouge évolueront vraisemblablement à moyen terme vers des pinèdes à pin rouge et à pin blanc au niveau du couvert, avec un sous-étage de sapin baumier et d'érable rouge, et une composante plus ou moins importante de pin blanc dans les parcelles de l'EC₂₃ et de l'EC₁₈; dans la parcelle de l'EC₁₃, il y aurait aussi une bonne proportion de peupliers à grandes dents. À plus long terme, lorsque les pins commenceront à mourir, le sapin baumier et l'érable rouge s'établiront graduellement comme espèces dominantes dans ces peuplements, accompagnées de feuillus durs comme le hêtre à grandes feuilles et le chêne rouge.

3.3 Croissance en diamètre des pins rouges

L'accroissement en diamètre des pins rouges a augmenté avec la diminution de la surface terrière résiduelle après l'éclaircie (figure 5a). Cette relation est bien connue pour beaucoup d'espèces ligneuses, y compris le pin rouge (Buckman *et al.* 2006). Dans ces forêts de plus de 80 ans, les accroissements en diamètre les plus grands ont été observés chez les pins rouges de DHP < 30 cm. Dans la parcelle EC13, certains pins avec un DHP de 12 cm ont crû de 15 cm en 25 ans. Dans des pinèdes naturelles à pin rouge et pin blanc de 54 ans de la forêt expérimentale de Petawawa en Ontario, Smithers (1954) a observé des accroissements en diamètre équivalents sur une période de 16 ans, pour les pins rouges des classes de DHP de 11 à 23 cm dans des parcelles ayant des surfaces terrières résiduelles de 19,5 et 25,5 m²·ha⁻¹, soit des valeurs comparables à celles de l'EC18 et de l'EC23 de la présente étude.

3.4 Rendement selon les traitements

Dans la présente étude, l'accent a été mis sur la surface terrière pour décrire le rendement (production nette) plutôt que sur le VMB. La surface terrière est une valeur estimée beaucoup plus fiable que le volume, du moins avec la façon dont ces 2 variables ont été calculées dans ce document. De plus, comme le bois à pâte du pin rouge n'est pas ou seulement peu utilisé par l'industrie, que la bille de pied a le plus de valeur pour le sciage et que les poteaux sont définis en grande partie par le diamètre à 2 m du sol, la surface terrière apparaît comme une meilleure variable indicatrice de la valeur des produits que le VMB. De plus, elle est fortement corrélée à ce dernier, en particulier pour les pins rouges de dimension sciage et de dimension poteau. Le calcul du volume en pmp (pied mesure de planche) plutôt qu'en mètres cubes aurait toutefois permis une meilleure estimation de la quantité de bois de sciage.

Globalement, pour l'ensemble des espèces, le rendement en surface terrière a diminué de façon significative avec l'augmentation de la surface terrière résiduelle des traitements (figure 6a). Pour le pin rouge, ces différences de rendement s'atténuent, mais semblent toujours présentes. Il faut faire attention aux résultats bruts par parcelle, puisque la proportion des pins rouges varie entre les parcelles (figure 1). De plus, puisque le taux de production varie selon la grosseur des pins rouges (figure 13c), le rendement dans chaque parcelle est influencé par la distribution diamétrale. Ainsi, les résultats de production des parcelles ne découlent pas uniquement de la surface terrière résiduelle.

Si l'on fixe la proportion en pin rouge de DHP de 9 à 24 cm et que l'on uniformise leur distribution diamétrale, les estimations de production effectuées pour les pins rouges de dimension sciage (DHP ≥ 24 cm) montrent que la production nette pour l'EC18 serait légèrement plus forte que pour l'EC23, lorsque la proportion de pins rouges ayant un DHP de 9 à 24 cm est grande (figure 10a). Pour les pins de dimension poteau, les estimations montrent que l'EC23 présenterait un léger avantage sur l'EC18 lorsque la proportion de pins rouges ayant un DHP de 9 à 32 cm est petite. Les différences calculées sont faibles et ne sont peut-être pas significatives, étant donné le faible nombre de parcelles par traitement. Cependant, elles concordent avec les taux de production interne observés par classe de DHP (figure 13d). Ces taux montrent que la production interne serait nettement plus grande pour l'EC18 que pour l'EC23 dans les classes de DHP plus petites que 23 cm, puis qu'elle deviendrait pratiquement égale entre les 2 traitements dans les classes de DHP de 27 et de 31 cm, et qu'elle serait plus faible pour l'EC18 que pour l'EC23 à partir de la classe de 35 cm. Ainsi, la production interne des pins de dimension poteau (DHP ≥ 32 cm) augmentera selon la proportion que ces arbres représentent par rapport aux pins plus petits. De plus, comme le recrutement en pins de dimension poteau est plus grand pour l'EC18 que l'EC23 pour une même proportion de pins de DHP < 32 cm, plus ces petits pins seront sous-représentés par rapport à ceux de dimension poteau, plus l'écart de production nette de pins de ces derniers augmentera entre ces 2 traitements.

Plusieurs auteurs mentionnent que le rendement en surface terrière des pinèdes à pin rouge après l'éclaircie varie peu pour une grande gamme de surfaces terrières résiduelles, lorsque l'analyse porte sur de courtes périodes ou en pratiquant des éclaircies successives (Buckman 1962, Cooley 1969, Day et Rudolph 1972, Liechty *et al.* 1986, Smithers 1954). Avec leur modèle de croissance, Buckman *et al.* (2006) montrent que pour des pinèdes à pin rouge de 25 ans et plus, la production brute en surface terrière (sans tenir compte de la mortalité) augmenterait rapidement jusqu'à des surfaces terrières d'environ 22 m²·ha⁻¹, puis resterait plus ou moins constante jusqu'à des surfaces terrières de plus de 40 m²·ha⁻¹.

Dans la présente étude, le recrutement a été une composante déterminante du rendement des pins rouges de dimension sciage. Il a représenté en moyenne 40 et 60 % de ce rendement pour l'EC23 et l'EC18, respectivement (tableau 6). Eyre et Zehngraff (1948) rapportent que 16 ans après l'éclaircie dans une pinède naturelle de 60 ans ayant

une surface terrière résiduelle de $19,5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$, le recrutement (en pmp) a représenté 40 % du rendement des pins ayant un DHP de 19 cm et plus. Dans la présente étude, le recrutement dans la parcelle 04 (surface terrière résiduelle : $19,5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$) a représenté 47 % de la production nette (en m^3) des pins rouges de dimension sciage (tableau 6).

Comme aucun traitement témoin sans éclaircie n'a été testé dans la présente étude, il n'est pas possible d'évaluer le bénéfice qu'ont procuré les éclaircies par rapport à un scénario dans lequel on aurait laissé croître la pinède sans intervention. Toutefois, les résultats montrent que l'éclaircie a permis, en particulier pour l'EC₁₈, dont les parcelles comportaient une forte proportion de pins rouges de DHP < 32 cm, de doubler en 25 ans le nombre de pins rouges de dimension sciage présents après l'éclaircie et de quadrupler celui des pins rouges de dimension poteau pendant la même période (tableau 7). Dans une pinède à pin rouge et à pin gris de 60 ans, Eyre et Zehngraff (1948) rapportent un rendement presque nul ($0,03 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) après 16 ans pour la parcelle témoin ($36,5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$) comparativement à un rendement moyen de $0,46 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les 3 parcelles éclaircies ($19,5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ de surface terrière résiduelle). De même, Smithers (1954) rapporte un rendement nul ($-0,02 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) après 15 ans pour la parcelle témoin ($33,6 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$) d'une pinède à pin rouge de 64 ans (projet P-218) comparativement à un rendement de $0,42 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ pour la parcelle éclaircie ($16,4 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ de surface terrière résiduelle).

3.5 Productivité et valeur marchande selon la grosseur des pins rouges

Le taux de production interne (différence entre l'accroissement des survivants et la mortalité) a été maximal pour la classe de DHP de 19 cm, après quoi il a diminué rapidement avec l'augmentation du DHP des pins rouges (figure 13c). Dans une pinède à pin rouge de 120 ans non éclaircie, Spurr et Allison (1956) ont observé que la productivité en surface terrière avait culminé chez les pins rouges ayant un DHP de 20 à 28 cm. Buckman *et al.* (2006) ont aussi conclu que la productivité des pins rouges diminue des classes intermédiaires basses à celle des dominants, pour des surfaces terrières résiduelles de $23 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ et moins, et que pour des surfaces terrières résiduelles inférieures à $27 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$, les pins rouges intermédiaires et les petits codominants accaparaient une plus grande proportion du rendement que les dominants. Pour obtenir

un rendement maximal, il semble avantageux de conserver le plus possible de pins rouges ayant un DHP de 15 à 28 cm après l'éclaircie, car ce sont ceux qui produiront le plus de surface terrière par m^2 de surface terrière résiduelle.

Avec l'objectif de maximiser le rendement vient aussi celui de maximiser la valeur de la production. La valeur d'un arbre augmente non seulement en fonction de son volume (grosceur), mais aussi de sa valeur par m^3 . Alors que le volume de bois augmente graduellement avec la grosseur de l'arbre, la valeur par m^3 est fonction de la qualité de l'arbre, qui repose entre autres sur des seuils de grosseur. Ainsi, pour le sciage, il a été déterminé dans cette étude que des DHP minimaux de 24, 30 et 46 cm correspondaient respectivement aux critères minimaux de grosseur des classes de qualité I, H et G des billes de sciage de pin rouge (tableau 1). Si l'on fait abstraction des défauts, la valeur par m^3 progresse donc par paliers plutôt qu'en continu, comme dans le cas du volume lui-même. Ainsi, lorsqu'un arbre change de classe de qualité, sa valeur augmente de façon importante et immédiate; par la suite, tant et aussi longtemps qu'il ne changera pas de classe de qualité, l'augmentation de sa valeur se fera par l'augmentation de sa grosseur (son volume). Par exemple, dans la zone 751 de tarification des bois dans laquelle se situe la présente pinède, la valeur marchande est de 11,66 \$ par m^3 pour les billes de qualité I, de 18,17 \$ par m^3 pour les billes de qualité H, de 28,11 \$ par m^3 pour les billes de qualité G et de 36,74 \$ par m^3 pour les billes de qualité F (BMMB 2020). Pour un pin rouge sans défauts majeurs dont le DHP passe de 28 cm (classe de qualité de sciage I) à 30 cm (classe de qualité H), la valeur de sa bille de pied augmente de 6,50 \$ par m^3 (+55 %) en raison du changement de classe de qualité, alors qu'elle n'augmente que de 15 % en raison de l'augmentation de son volume^d. La valeur totale de cette bille augmente de 80 % pour une augmentation du DHP de seulement 2 cm. Pour un pin rouge de 30 cm de qualité de sciage H qui atteint 32 cm et se classe comme poteau (qualité F), sa valeur double par m^3 , et ce non seulement sur le volume de la bille de pied (3,1 m de long), mais sur le volume du poteau (11 m de long). Ces exemples illustrent qu'il est profitable de laisser sur pied un pin qui accèdera à une classe de qualité supérieure lors de la prochaine récolte, et que la valeur marchande d'un pin de qualité poteau est plus élevée que celle d'un pin de qualité sciage.

^d Le volume de la bille de pied a été calculé selon la méthode de Smalian pour une longueur de 3,1 m (longueur maximale pour un pin rouge de DHP de 30 cm), afin de respecter le diamètre au fin bout sans écorce de la classe de qualité H. Les diamètres au fin bout et au gros bout sans écorce de la bille ont été calculés selon la méthode présentée à la section 1.4.2.

3.6 Éclaircie tardive des pinèdes à pin rouge naturelles

Contrairement à celle du pin blanc, la croissance en diamètre du pin rouge atteint un plateau à des DHP de 20 à 35 cm, puis elle diminue; les moyennes d'accroissement du DHP de ce plateau sont de 10 cm (EC₁₈) et de 8 cm (EC₂₃) en 25 ans (figure 5a). De même, le taux de production en surface terrière ne cesse de diminuer à partir de la classe de DHP de 19 cm (figure 13). Pour ces raisons, si le but est de maximiser la production et la rentabilité du peuplement, l'objectif d'aménagement ne devrait pas être la production de pins rouges de grandes dimensions (DHP de plus de 45 cm) afin d'atteindre la meilleure classe de qualité de sciage (classe G). Après 25 ans, pour l'EC₁₈ et l'EC₂₃, les pins rouges de DHP ≥ 46 cm ne représentaient qu'un peu plus de 10 % de la surface terrière en pin rouge (figure 4). Il serait préférable de viser plutôt la production de sciage de qualité H (DHP ≥ 30 cm) et de poteaux (DHP ≥ 32 cm), car les grosseurs à atteindre pour ces classes sont mieux adaptées à la croissance en diamètre du pin rouge. La production de poteaux est à privilégier pour maximiser le revenu net, puisqu'un pin rouge de qualité poteau possède une valeur supérieure par m³ à un pin rouge de qualité sciage (Grossman et Potter-Witter 1991).

Dans des pinèdes de 80 ans et plus, il semble donc justifié, lors d'une éclaircie, de concentrer la récolte sur les pins rouges de DHP > 32 cm et de laisser sur pied un maximum de pins rouges présentant peu de défauts et ayant des DHP de 15 à 32 cm, tout en favorisant un espacement régulier entre les tiges. Ce faisant, la valeur de la récolte sera augmentée et celle de la production future sera maximisée. Desmarais et Leak (2005) ont montré que les arbres qui passent de dimensions de non-sciage (*poletimber* [DHP de 12,7 à 22,8 cm]) à sciage (*sawtimber* [DHP $\geq 22,9$ cm]) sont ceux qui ont montré les plus grands taux annuels de changement de valeur. Lors des éclaircies, ces auteurs suggèrent de retenir plus de ces arbres (*poletimber*) vigoureux de qualité afin qu'ils atteignent les dimensions pour le bois de sciage, et de prélever davantage de bois de sciage, ce qui augmentera les revenus (pourvu qu'il existe un marché pour les petits bois de sciage).

Selon les estimations, la production des pins de dimension poteau (DHP ≥ 32 cm) serait légèrement plus faible pour l'EC₁₈ que pour l'EC₂₃. Néanmoins, l'EC₁₈ produira des pins de plus gros diamètres, autant chez les recrues que chez les survivants, parce que ce traitement est associé à un accroissement plus grand du DHP (figure 5a). Par contre, après 25 ans, on s'attendra à trouver un plus grand

nombre de pins rouges de dimension poteau dans les parcelles de l'EC₂₃ que dans celles de l'EC₁₈, ce qui confèrera au traitement EC₂₃ un léger avantage sur le plan de la surface terrière produite. Selon les marchés en vigueur pour les poteaux de petites dimensions, le sylviculteur pourra donc favoriser l'un ou l'autre de ces traitements d'éclaircie. À la suite d'analyses économiques sur l'éclaircie commerciale des pinèdes à pin rouge naturelles, Lundgren (1965) conclut que c'est le traitement laissant la plus faible surface terrière résiduelle (21 m²·ha⁻¹) qui s'est avéré le plus rentable. Il suggère ainsi que la croissance en diamètre serait plus déterminante que la croissance en volume pour la rentabilité de l'éclaircie.

Dans les peuplements contenant une proportion importante d'espèces non désirées ou de petits pins rouges (DHP < 25 cm), l'EC₁₈ semble le meilleur choix. Ce traitement d'éclaircie permettrait d'augmenter le rendement en pin rouge, puisque le prélèvement des espèces non désirées augmentera la proportion de pins rouges dans le peuplement résiduel. De plus, ce traitement maximiserait la production nette en pins rouges de dimension sciage et de dimension poteau, à cause du recrutement important associé à une forte proportion de petits et de moyens pins rouges (figure 11b) et d'une production interne assez semblable, étant donnée la faible proportion de pins rouges de DHP > 32 cm.

À l'inverse, dans les peuplements bien pourvus en pins rouges dont la plupart ont atteint des dimensions de plus de 25 cm, l'EC₂₃ pourrait être un meilleur choix. Ce traitement d'éclaircie permettrait de laisser croître un plus grand nombre de pins, et ainsi, de maximiser la surface terrière lors de la prochaine récolte. De plus, le rendement serait maximisé : d'une part, le recrutement en pins rouges de dimension poteau serait plus élevé que pour l'EC₁₈ pour des pins rouges de DHP > 25 cm (figure 11b), et d'autre part, le taux de production interne pour ce traitement est comparable ou plus élevé que pour l'EC₁₈ chez les pins rouges de DHP ≥ 23 cm (figure 13d).

Les éclaircies pratiquées dans la présente étude sont des éclaircies mixtes, lors desquelles le prélèvement s'est fait dans toutes les classes de diamètre plutôt qu'en ciblant certaines grosseurs de pins rouges en particulier (voir l'annexe 7). Si les éclaircies avaient davantage ciblé les grosses tiges, un rendement plus élevé aurait vraisemblablement été obtenu, et la valeur du bois récolté lors de l'éclaircie aurait été plus grande. Bradford et Palik (2009) présentent les résultats d'éclaircies commerciales pratiquées au Minnesota dans une pinède à pin rouge de 50 ans. Leurs résultats sur 40 ans de

suivi (et après plusieurs éclaircies) montrent que l'éclaircie par le haut (récolte des dominants et codominants) a donné lieu à une meilleure production en surface terrière que l'éclaircie par le bas, à des surfaces terrières résiduelles de 7, 14, 21, 25 et 28 m²·ha⁻¹; plus la surface terrière était faible, plus la différence relative de production entre ces 2 types d'éclaircies augmentait. Dans ce même dispositif, Buckman *et al.* (2006) montrent que la production pour l'éclaircie mixte a été intermédiaire entre celle pour l'éclaircie par le haut et celle pour l'éclaircie par le bas.

En résumé, pour maximiser le rendement de pinèdes de plus de 80 ans qui n'ont pas été aménagées, il ne semble pas avisé de produire du bois de grosses dimensions avec le pin rouge, parce que la croissance en diamètre plafonne à des DHP relativement petits et que la productivité par m² de surface terrière diminue rapidement avec l'augmentation du DHP. À moins que les marchés soient peu favorables aux poteaux de petites dimensions ou que la valeur des poteaux de DHP > 40 cm soit beaucoup plus grande que celle des poteaux plus petits, il semble préférable de baser la production de ces pinèdes sur les pins rouges de dimensions moyennes (30-40 cm). Cette approche se distingue de celle recommandée pour l'aménagement des pinèdes à pin blanc non aménagées du même âge (Godbout 2016), et ce, même si les pinèdes à pin rouge peuvent réagir positivement aux éclaircies répétées jusqu'à des âges d'au moins 140 ans (D'Amato *et al.* 2010).

Comme le pin rouge ne se régénère à peu près pas dans ces pinèdes, la production en pin rouge de ces peuplements dépend de la quantité de pins rouges déjà présents. Dans un objectif de production de pin rouge, l'éclaircie commerciale pourrait être pratiquée tant et aussi longtemps que la quantité résiduelle de pins rouges après l'éclaircie reste suffisante pour produire un nombre de poteaux et un volume de sciage qu'il sera rentable d'exploiter lors de la prochaine intervention. Cependant, plus le peuplement vieillira, plus le rendement en surface terrière diminuera. Bradford et Palik (2009) ont montré que pour des pinèdes à structure régulière éclaircies pour une première fois à 45 ans à des surfaces terrières résiduelles de 21, 28 et 34 m²·ha⁻¹ puis à des intervalles de 10 ans, le rendement en surface terrière obtenu à 90 ans avait diminué de près de moitié par rapport à celui observé à 60 ans. Par contre, cette diminution a été moindre pour le traitement associé à une surface terrière résiduelle de 14 m²·ha⁻¹. Si la quantité résiduelle de pins rouges après l'éclaircie est insuffisante pour produire un nombre de poteaux et un volume de sciage qu'il

sera rentable d'exploiter lors de la prochaine intervention, mieux vaut régénérer le peuplement par une coupe totale suivie d'un reboisement, ou peut-être par une coupe progressive, même si l'obtention d'une régénération naturelle adéquate en pin rouge est très variable et demeure un défi (D'Amato *et al.* 2012, Lundgren et Buckman 1998, Martin et Lorimer 1996, OMNR 1998, Roberts *et al.* 2016). Dans ce dernier cas, l'enrichissement en pin rouge sera probablement nécessaire.

La prolifération du sapin baumier et de l'érable rouge à la suite de l'éclaircie dans ces pinèdes âgées pose peu de problème pour l'aménagement de ces peuplements. Même si une deuxième coupe d'éclaircie était pratiquée et que ces espèces se développaient davantage, celles-ci ne nuiraient pas à la croissance des pins rouges déjà plus gros; elles pourraient même participer à leur élagage naturel. Comme le pin rouge ne se régénère pratiquement pas après l'éclaircie, ces espèces ne nuisent pas non plus au développement d'une régénération préétablie en pin rouge. Éventuellement, elles pourraient être récoltées lors de la coupe de régénération. Cependant, l'érable rouge forme des rejets une fois coupé; plus cette essence aura proliféré avant la coupe, plus elle exercera de concurrence sur la régénération de pins après la coupe de régénération.

3.7 Densité résiduelle et production de poteaux

Pour faire partie de la classe de qualité poteau (classe F), un pin rouge ne doit pas avoir de nœuds dont le diamètre excède 6 cm (pour les petits poteaux de moins de 15,5 m de long) ou 10 cm (pour les gros poteaux de plus de 15,5 m de long; Boulianne 2019). De plus, la somme des diamètres des nœuds de plus de 1 cm sur n'importe quelle section de 30 cm de long ne doit pas dépasser 18 cm pour les petits poteaux et 24 cm pour les gros poteaux. Puisqu'un verticille chez le pin rouge en peuplement naturel contient généralement 3 à 4 branches (Guilkey 1958), le diamètre maximal moyen des branches d'un verticille doit se situer autour de $18/4 = 4,5$ cm. Comme la densité du peuplement influence le diamètre des branches du pin rouge (Laidley et Barse 1979, Stiell 1964), la proportion de pins rouges de qualité poteau augmente avec la densité du peuplement (Guilkey 1958). Afin de maximiser la production de poteaux à partir de jeunes plantations, cet auteur recommande de conserver une surface terrière d'au moins 32 m²·ha⁻¹ jusqu'à ce que le fût des arbres soit d'au moins 12 m de long.

Dans la présente étude, la surface terrière des parcelles avant l'éclaircie variait de 34 à 39 m²·ha⁻¹.

Ces valeurs élevées ont vraisemblablement empêché les pins rouges de produire des branches de trop gros diamètres. L'éclaircie a pu favoriser la production de grosses branches, mais après 25 ans, les pins rouges de DHP > 30 cm possédaient des fûts de 11 à 20 m de long, selon leur hauteur totale (voir l'annexe 8); cela correspond à la totalité ou presque de la longueur d'un poteau. Guilkey (1958) mentionne d'ailleurs que lorsque la longueur du fût est égale à la longueur d'un poteau, on peut ouvrir davantage le couvert pour permettre une plus forte croissance en diamètre, sans risquer le déclassement de qualité de l'arbre.

3.8 Comparaison entre le pin rouge et le pin blanc

Comme les pins rouges sont beaucoup moins nombreux que les pins blancs dans les forêts du Québec, leur sylviculture n'est pas toujours distincte de celle des pins blancs. Pourtant, ces 2 espèces de grands pins méritent d'être aménagées de façon différente.

Le pin rouge est moins tolérant à l'ombre que le pin blanc, et la croissance des 2 espèces dans le temps est différente. Dans la présente étude, alors que l'accroissement moyen en diamètre du pin rouge a plafonné dès les classes de DHP de 19 cm pour l'EC₁₈, celui du pin blanc n'a cessé d'augmenter jusqu'à au moins la classe de DHP de 47 cm (figure 5a). L'accroissement en diamètre a été semblable pour les 2 espèces jusqu'à des DHP d'environ 25 cm, puis le pin blanc a surpassé le pin rouge à des DHP plus gros. Cette différence de croissance en diamètre rendra la pinède à pin rouge moins productive que la pinède à pin blanc au fur et à mesure que les pins grossiront. Frothingham (1914) a observé que l'accroissement en diamètre du pin rouge commençait à diminuer vers l'âge de 100 ans, tandis que celui du pin blanc demeurerait constant et uniforme jusqu'à des âges avancés. Dans une pinède à pin rouge naturelle, Spurr et Allison (1956) mentionnent que le pin rouge a été plus vigoureux que le pin blanc jusqu'à un âge de 100 ans, mais qu'après 100 ans, c'est le pin blanc qui a présenté à la fois les meilleures croissances

en hauteur et en diamètre, pour atteindre de plus grosses dimensions que le pin rouge. À la station expérimentale de Petawawa en Ontario, Burgess et Robinson (1998) ont observé, dans une pinède à pin blanc et pin rouge éclaircie pour la première fois à 40 ans, que le taux d'accroissement en diamètre du pin rouge avait diminué pendant 71 ans comparativement à celui du pin blanc, alors que les plus gros pins blancs avaient atteint des DHP de 70 à 80 cm, les pins rouges n'avaient atteint que des DHP de 50 à 60 cm.

Plus le pin rouge avancera en âge, plus l'atteinte de gros diamètres sera lente, contrairement au pin blanc qui conserve un potentiel élevé de croissance en diamètre au-delà de l'âge de 100 ans. Cette différence de comportement pour la croissance en diamètre est sans doute reliée à la croissance en hauteur des 2 espèces. En effet, sur des stations de bonne qualité, la croissance en hauteur du pin rouge commence à ralentir par rapport à celle du pin blanc vers 60 ans (Ardenne 1950, Plonski 1974, Woods et Miller 1996; voir l'annexe 9). Cette baisse relative de la croissance en hauteur du pin rouge se répercute directement sur la capacité de son houppier à se développer avec le temps, comparativement à celui du pin blanc.

Le taux de mortalité du pin rouge a été globalement près de 2 fois plus faible pour le pin rouge que pour le pin blanc (9 % contre 16 %; tableau 3). Quoique les taux de mortalité ont été semblables pour les classes de DHP < 19 cm, le pin rouge a montré un taux de mortalité beaucoup plus faible (1 à 3 %) pour les classes de DHP ≥ 19 cm comparativement au pin blanc (8 à 13 %; voir l'annexe 10). Le pin rouge a d'ailleurs été l'espèce qui a montré les plus faibles taux de mortalité pour les classes de DHP ≥ 19 cm parmi celles présentes dans les parcelles (voir les annexes 10 et 11). Buckman *et al.* (2006) ont calculé, à partir de plus de 900 parcelles, que le taux moyen de mortalité du pin rouge se situait autour de 3,4 % du rendement brut en surface terrière. Ce très faible taux de mortalité semble inhérent au pin rouge, une essence reconnue pour son taux de mortalité parmi les plus faibles chez les espèces ligneuses (Buchman 1983, Schmidt 2002).

Conclusion et recommandations

L'éclaircie pratiquée dans ces pinèdes à pin rouge âgées de plus de 80 ans et ayant une surface terrière initiale de 35-40 m²·ha⁻¹ a été un bon choix sylvicole. Les rendements en pin rouge de dimension sciage ont été de l'ordre 0,50 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour une proportion de 80 % de pins rouges, dont 20 % avec des DHP de 9 à 24 cm, après des éclaircies laissant des surfaces terrières résiduelles moyennes de 18,5 m²·ha⁻¹ (EC18) et de 23,5 m²·ha⁻¹ (EC23). Après 25 ans, le traitement EC18, dont les parcelles comportaient une forte proportion de pins rouges de DHP < 32 cm, a permis de doubler le nombre de pins rouges de dimension sciage et de quadrupler celui des pins rouges de dimension poteau, par rapport aux quantités présentes immédiatement après l'éclaircie.

Au regard des résultats obtenus, les recommandations suivantes pourraient maximiser le rendement en pin rouge lors d'une première éclaircie commerciale dans des pinèdes à pin rouge naturelles de 80 ans :

- Laisser une surface terrière résiduelle de 18 m²·ha⁻¹, en particulier en présence d'une forte proportion de pins rouges de DHP < 32 cm et d'espèces non désirées; lorsque ces proportions sont minimales, une surface terrière de 23 m²·ha⁻¹ conviendrait autant, sinon mieux.
- Tout en visant à espacer les houppiers des pins rouges résiduels, pratiquer une éclaircie par le haut en favorisant le maintien sur pied de ceux ayant un DHP de 15 à 32 cm et en prélevant davantage parmi ceux de DHP > 32 cm. Ainsi, l'éclaircie sera plus rentable, le rendement par m² de surface terrière sera maximisé et la valeur de la production sera augmentée puisque de nombreux pins atteindront les dimensions nécessaires pour produire des billes de sciage ou des poteaux.
- Prélever fortement les tiges des espèces dont l'âge de maturité biologique est atteint, comme cela a été le cas pour le pin gris et les peupliers dans la présente étude, de même que celles qui sont à risque de présenter un taux élevé de mortalité après l'éclaircie, comme le bouleau à papier et le sapin baumier.

Références bibliographiques

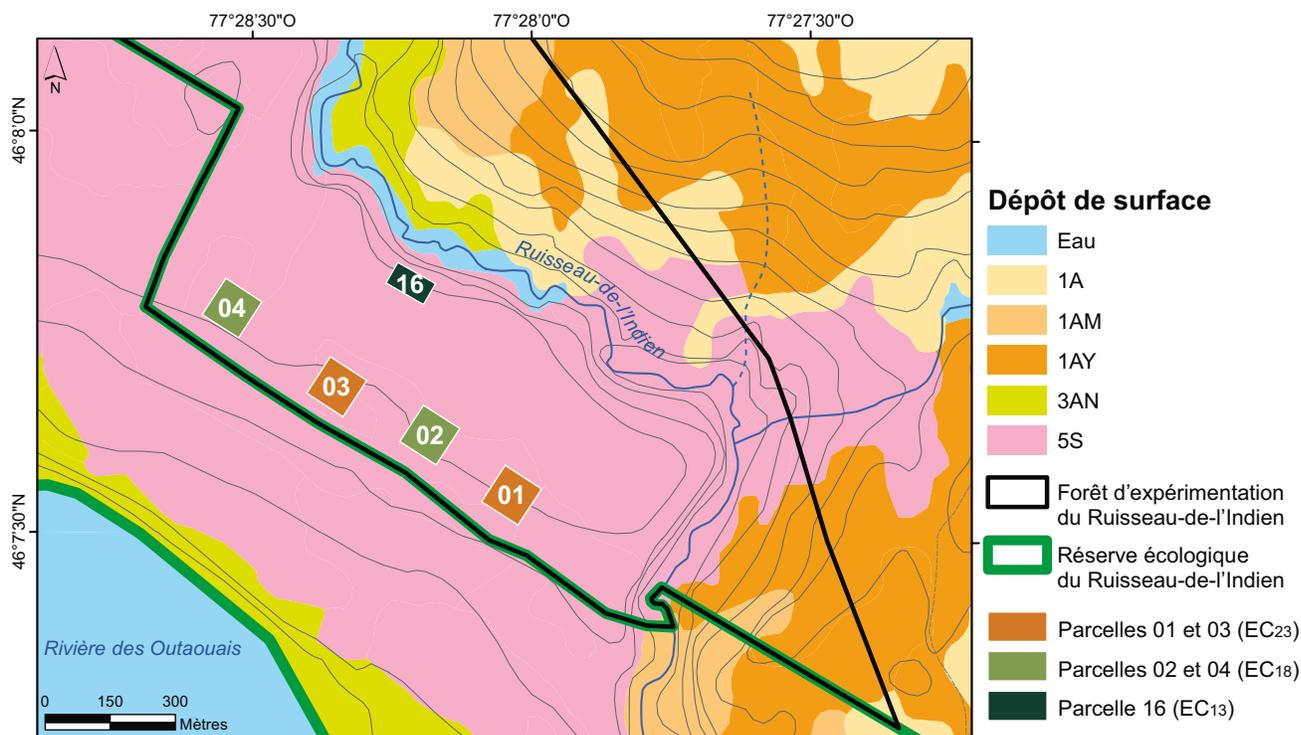
- Ardenne, M., 1950. *Growth of second growth red and white pine in southeastern Ontario*. Ontario Department of Lands and Forests, Research Division. Research Report n° 18. 30 p.
- Benzie, J.W., 1977. *Manager's handbook for red pine in the North Central states*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). General Technical Report NC-33. 22 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nc033.pdf
- [BMMB] Bureau de Mise en Marché des Bois, 2020. *Grille de taux de la valeur marchande des bois sur pied. – Période du 1^{er} janvier 2020 au 31 mars 2020*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau de mise en marché des bois. https://bmmmb.gouv.qc.ca/media/52097/4-taux_1janvier-31mars2020.pdf
- Boulianne, M., 2019. *Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État. – Exercice 2019-2020*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau de mise en marché des bois. 311 p. https://bmmmb.gouv.qc.ca/media/50352/manuel_de_mesurage_2019.pdf
- Bradford, J.B. et B.J. Palik, 2009. *A comparison of thinning methods in red pine: consequences for stand-level growth and tree diameter*. Can. J. For. Res. 39: 489-496. <https://doi.org/10.1139/X08-201>
- Brown, J.-L., 1994. *Essais de différentes intensités d'éclaircie dans des pinèdes d'âges multiples situées dans la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien, circonscription de Pontiac, Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 110. 249 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire110.pdf>
- Buchman, R.G., 1983. *Survival predictions for major Lake States tree species*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-233. 7 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rp/rp_nc233.pdf
- Buckman, R.E. 1962. *Three growing-stock density experiments in Minnesota red pine: a progress report*. U.S.D.A Forest Service, Lake States Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Station Paper n° 99. 9 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.81090>
- Buckman, R.E., B. Bishaw, T.J. Hanson et F.A. Benford 2006. *Growth and yield of red pine in the Lake States*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Research Station. Saint Paul, MN (États-Unis) General Technical Report NC-271. 114 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nc271.pdf
- Burgess, D. et C. Robinson, 1998. *Canada's oldest permanent sample plots – Thinning in white and red pine*. For. Chron. 74(4): 606-616. <https://doi.org/10.5558/tfc74606-4>
- Cooley, J.H. 1969. *Initial thinning in red pine plantations*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Research Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-35. 6 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rp/rp_nc035.pdf
- D'Amato, A.W., B.J. Palik et C.C. Kern, 2010. *Growth, yield, and structure of extended rotation Pinus resinosa stands in Minnesota, USA*. Can. J. For. Res. 40(5): 1000-1010. <https://doi.org/10.1139/X10-041>
- D'Amato, A.W., J. Segari et D. Gilmore. 2012. *Influence of site preparation on natural regeneration and understory plant communities within red pine shelterwood systems*. North. J. Appl. For. 29(2): 60-66. <https://doi.org/10.5849/njaf.11-021>
- Day, M.W. et V.J. Rudolph, 1972. *Thinning plantation red pine*. Michigan State University, Michigan Agricultural Experiment Station. Research Report n° 151. 10 p.
- Desmarais, K.M. et W.B. Leak, 2005. *Ten-year performance of eastern white pine under a crop tree release regime on an outwash site*. North. J. Appl. For. 22(2): 139-142. <https://doi.org/10.1093/njaf/22.2.139>
- Erickson, G.W., 1996. *Growth and yield of a 59-year-old red pine plantation (plot 99) in northern Minnesota*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis) Research Note NC-369. 5 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rn/rn_nc369.pdf

- Eyre, F.H. et P. Zehngraff, 1948. *Red pine management in Minnesota*. U.S.D.A. Forest Service, Lake States Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Circular n° 778. 70 p.
- Frothingham, E.H., 1914. *White pine under forest management*. U.S.D.A. Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Bulletin n° 13. 70 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.108068>
- Gilmore, D.W., T.C. O'Brien et H.M. Hoganson, 2005. *Thinning red pine plantations and the Langsaeter hypothesis: A northern Minnesota case study*. North. J. Appl. For. 22(1): 19-26. <https://doi.org/10.1093/njaf/22.1.19>
- Godbout, C., 2016. *Éclaircie commerciale de pinèdes à pin blanc et de pinèdes à pin rouge de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : Résultats de 10 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 177. 102 p. <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Godbout-Christian/Memoire177.pdf>
- Gosselin, J., 2002. *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 3a – Collines de l'Outaouais et du Témiscamingue et 3b – Collines du lac Nominique*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et de la productivité des stations. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-3ab.pdf>
- Grossman, G.H. et K. Potter-Witter, 1991. *Economics of red pine management for utility pole timber*. North. J. Appl. For. 8(1): 22-25. <https://doi.org/10.1093/njaf/8.1.22>
- Guilkey, P.C., 1958. *Managing red pine for poles in lower Michigan*. U.S.D.A. Forest Service, Lake States Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Station Paper n° 57. 21 p.
- Horton, K.W. et W.G.E. Brown, 1960. *Écologie du pin blanc et du pin rouge dans la région forestière des Grands lacs et du Saint-Laurent*. Gouvernement du Canada, ministère du Nord canadien et des ressources nationales, Direction des forêts, Division des recherches sylvicoles, Mémoire technique n° 88. 28 p.
- Laidley, P.R. et R.G. Barse, 1979. *Spacing affects knot surface in red pine plantations*. U.S.D.A Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis) Research Note NC-246. 3 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rn/rn_nc246.pdf
- Liechty, H.O., G.D. Mroz et D.D. Reed. 1986. *The growth and yield responses of a high site quality red pine plantation to seven thinning treatments and two thinning intervals*. Can. J. For. Res. 16: 513-520. <https://doi.org/10.1139/x86-091>
- Logan, K.T., 1950. *Influence of thinning on reproduction beneath a red and white pine stand*. Government of Canada, Department of Resources and Development, Forestry Branch, Division of Forest Research. Silvicultural Leaflet n° 50. 3 p.
- Lundgren, A.L., 1965. *Thinning red pine for high investment returns*. U.S.D.A. Forest Service, Lake States Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper LS-18. 20 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.83686>
- Lundgren, A.L., 1981. *The effect of initial number of trees per acre and thinning densities on timber yields from red pine plantations in the Lake States*. U.S.D.A Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-193. 25 p. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rp/rp_nc193.pdf
- Lundgren, A.L. et R.E. Buckman, 1998. « Managing red pine for timber productivity and sustainability: Lessons learned over the past century ». Dans : *Improving forest productivity for timber: A key to sustainability*. Conférence tenue le 1, 2 et 3 décembre 1998. University of Minnesota, Duluth, MN (États-Unis). 7 p.
- Martin, J. et G. Lorimer, 1996. *How to manage red pine*. University of Wisconsin, School of Natural Resources, Department of Forest Ecology and Management. Forestry Facts n° 82. <https://forestandwildlifeecology.webhosting.cals.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/111/2017/07/82.pdf>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015. *Norme de stratification écoforestière. – Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers. 101 p. <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification.pdf>

- Mulloy, G.A., 1946. *Thinning red pine*. Rockland, Ontario (1943). Canada, Dominion Forest Service. Silvicultural Research Note n° 79. 29 p.
- [OMNR] Ontario Ministry of Natural Resources, 1998. *Shelterwood systems in red pine*. Northwest Science & Technology. Thunder Bay, ON. Technical Report n° 4. 15 p.
- Peck, J.E. et E.K. Zenner, 2009. *Spatial patterns of natural Pinus strobus L. regeneration in a Pinus resinosa Ait. stand*. J. Torrey Bot. Soc. 136(3): 369-379. <https://doi.org/10.3159/09-RA-015.1>
- Perron, J.Y., 2003. *Tarif de cubage général. Volume marchand brut*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune, et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 53 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/tarif-de-cubage-64.pdf>
- Plonski, W.L., 1974. *Normal yield tables (metric) for major forest species of Ontario*. Government of Ontario, Ministry of Natural Resources, Division of forests. 40 p.
- Powers, M.D., B.J. Palik, J.B. Bradford, S. Fraver et C.R. Webster, 2010. *Thinning method and intensity influence long-term mortality trends in a red pine forest*. For. Ecol. Manage. 260: 1138-1148. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.07.002>
- Richards, F.J., 1959. *A flexible growth function for empirical use*. J. Exp. Bot. 10(2): 290-301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Roberts, M.W., A.W. D'Amato, C.C. Kern et B.J. Palik, 2016. *Effects of variable retention harvesting on natural tree regeneration in Pinus resinosa (red pine) forests*. For. Ecol. Manage. 385: 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.025>
- Schmidt, T.L., 2002. « Red pine in the northern Lake States ». Dans : Gilmore, D.S. et L.S. Yount (édit.), *Proceedings of the Red Pine SAF Region V Technical Conference*. University of Minnesota. Staff Paper n° 157. p. 3-16. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2003/nc_2003_schmidt_001.pdf
- Sheedy, G., 1997. *Éclaircie et fertilisation d'une plantation de pin rouge du centre du Québec : résultats de sept ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 84. 9 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connais-sances/recherche/Note84.pdf>
- Shugart, Jr., H.H., T.R. Crow et J.M. Hett, 1973. *Forest succession models: A rationale and methodology for modelling forest succession over large regions*. For. Sci. 19(3): 203-212.
- Smithers, L.A., 1954. *Thinning in red and white pine stands at Petawawa forest experiment station*. Government of Canada, Department of Northern Affairs and National Resources, Forestry Branch, Forest Research Division. Silvicultural Research Note n° 105. 52 p.
- Spurr, S.H. et J.H. Allison, 1956. *The growth of mature red pine in Minnesota*. J. For. 54(7): 446-451.
- Stiell, W.M., 1964. *Twenty-year growth of red pine planted at three spacings*. Government of Canada, Department of Forestry, Forest Research Branch, Publication n° 1045. 24 p.
- Ung, C.-H., X.J. Guo, et M. Fortin, 2013. *Canadian national taper models*. For. Chron. 89(2): 211-224. <https://doi.org/10.5558/TFC2013-040>
- von Althen, F.W. et W.M. Stiell, 1990. *A red pine case history : development of the Rockland plantation from 1914 to 1986*. For. Chron. 66(6): 606-610. <https://doi.org/10.5558/tfc66606-6>
- Wilson, F.G., 1955. *Evaluation of three thinnings at Star Lake*. For. Sci. 1(3): 227-231.
- Woods, M.E. et R.J. Miller, 1996. *Red pine and white pine site index curves and tables for south central region*. Government of Ontario, Ministry of Natural Resources, South / Central Sciences Section, Science Development and Transfer Branch, Science and Information Resources Division, Technical Note n° 2.11 p.
- Woods, M.E. et M. Penner, 2000. *Growth and yield response of red pine plantations to thinning*. Government of Ontario, Science Development and Transfer Branch, Southcentral Sciences Section, Technical Note n° 6. 36 p.

Annexes

Annexe 1. Carte de la répartition des parcelles de la pinède à pin rouge et des dépôts de surface. Traitements : EC23 (parcelles orange, 100 m × 100 m), EC18 (parcelles vertes, 100 m × 100 m) et EC13 (parcelle noire, 50 m × 100 m). Dépôts de surface : 1A, 1AM, 1AY = till indifférencié; 3AN = dépôt alluvial ancien; 5S = dépôt marin d'eau peu profonde constitué de sable et parfois de gravier, généralement bien triés (MFFP 2015).



Annexe 2. Modélisation de la relation hauteur-DHP pour le pin rouge

La relation hauteur-DHP a été déterminée à partir des mesures de hauteur totale et de DHP de 116 pins rouges échantillonnés dans les 5 parcelles du dispositif expérimental.

Trois modèles ont été testés, soit :

- le modèle utilisé dans Godbout (2016) : $Ht_{jk} = a + b DHP_{jk} + c (\sqrt{DHP_{jk}})$
- le modèle logarithmique : $Ht_{ijk} = a + b \ln(DHP_{ijk})$
- le modèle de Chapman-Richards : $Ht_{jk} = 1,3 + a (1 - e^{-bDHP_{jk}})^c$ (Richards 1959)

Deux variables binaires (booléennes) ont été ajoutées aux modèles pour tenir compte des 3 niveaux d'intensité d'éclaircie. Leurs valeurs ont été définies de la façon suivante :

$X1i = 0$ et $X2i = 0$ si le traitement d'éclaircie i de la parcelle j est EC13,

$X1i = 1$ et $X2i = 0$ si le traitement d'éclaircie i de la parcelle j est EC18,

$X1i = 0$ et $X2i = 1$ si le traitement d'éclaircie i de la parcelle j est EC23.

De plus, les effets aléatoires associés aux parcelles ont été ajoutés aux modèles, puisque les données mesurées sur les arbres ne sont pas nécessairement indépendantes.

La procédure NLMIXED du logiciel SAS, version 9.4, a été utilisée afin de comparer tous les modèles sur la même base, en utilisant le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) pour les échantillons de petite taille

ainsi que le carré moyen des résidus (CMR). Cependant, pour les modèles 1 et 2, les premières étapes de réduction des paramètres des modèles ont été effectuées avec la procédure MIXED de SAS. Les valeurs des paramètres obtenus ont alors été utilisées comme paramètres de départ dans NLMIXED pour obtenir le modèle final. Les hypothèses sous-jacentes aux modèles ont été vérifiées de façon graphique ainsi qu'à l'aide des tests de Shapiro-Wilk (normalité). L'hypothèse d'homogénéité de la variance a été confirmée, et aucune pondération ni transformation n'a été appliquée.

Les résultats montrent que seul le modèle 2 présentait une différence significative entre les traitements, puisqu'une des 2 variables binaires X a été retenue dans ce modèle ($p < 0,0001$; tableau A2.1). Étant donné que seule la variable binaire X_2 a été trouvée significative, c'est donc le traitement EC23 qui différait des 2 autres traitements (EC18 et EC13). Ainsi, dans ce modèle, la variable binaire $X_2 = 1$ pour l'EC23, sinon $X_2 = 0$ pour les 2 autres traitements.

Tableau A2.1 Valeurs des coefficients des modèles, ainsi que le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) et du carré moyen des résidus (CMR).

Modèles						AICc	CMR
Modèle 1 $Ht_{jk} = a + b DHP_{jk} + c (1/DHP_{jk})$						434,0	2,04
Paramètre	Valeur estimée	Erreur type	dl	Valeur de t	Pr > t		
a	21,9741	1,789	4	12,29	0,0003		
b	0,1261	0,034	4	5,10	0,0215		
c	-120,20	21,169	4	-5,68	0,0047		
Modèle 2 $Ht_{ijk} = a + b X_{2i} + c \ln(DHP_{ijk})$						435,4	2,33
Paramètre	Valeur estimée	Erreur type	dl	Valeur de t	Pr > t		
a	-7,5676	1,6604	116	-4,56	< 0,0001		
b	1,5556	0,2979	116	5,22	< 0,0001		
c	8,3999	0,4734	116	17,74	< 0,0001		
Modèle 3 $Ht_{jk} = 1,3 + a (1 - e^{-bDHP_{jk}})^c$						439,5	2,15
Paramètre	Valeur estimée	Erreur type	dl	Valeur de t	Pr > t		
a	28,5928	2,521	4	11,34	0,0003		
b	0,03385	0,013	4	2,67	0,056		
c	0,7533	0,166	4	4,55	0,010		

où Ht = hauteur totale (m); DHP = diamètre à hauteur de poitrine (cm); X = variable binaire pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie; a , b , c = coefficients; i = traitement, j = parcelle, k = arbre.

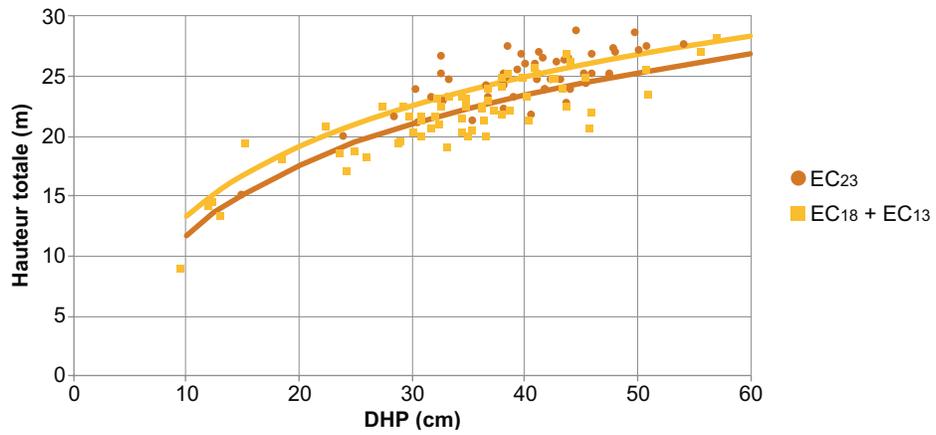


Figure A2.1 Hauteur totale des pins rouges en fonction de leur DHP 25 ans après l'éclaircie, selon les traitements, et courbes du modèle retenu (modèle 2) pour estimer la hauteur totale dans le calcul des volumes marchands bruts.

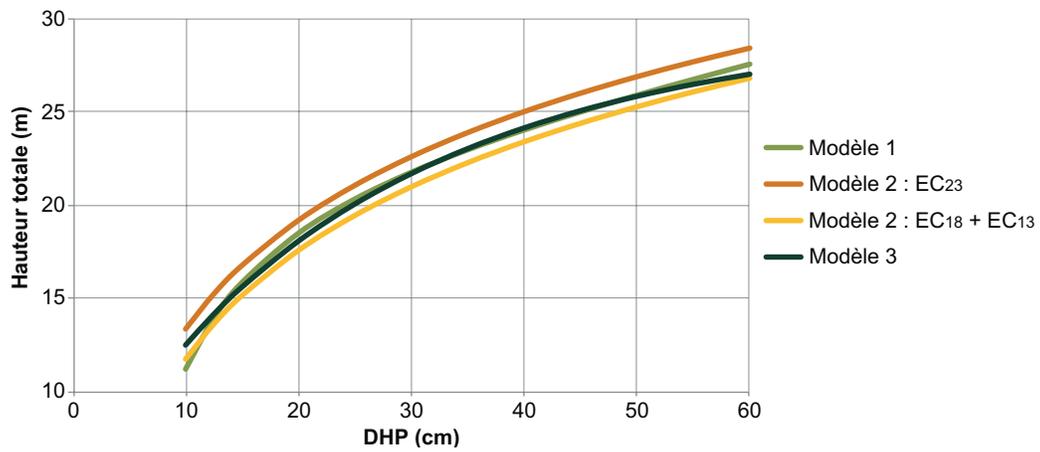


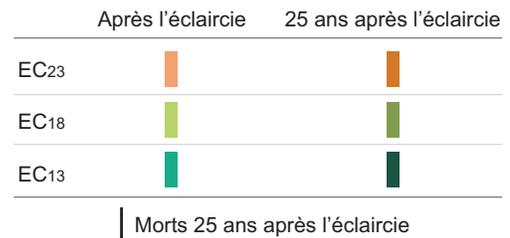
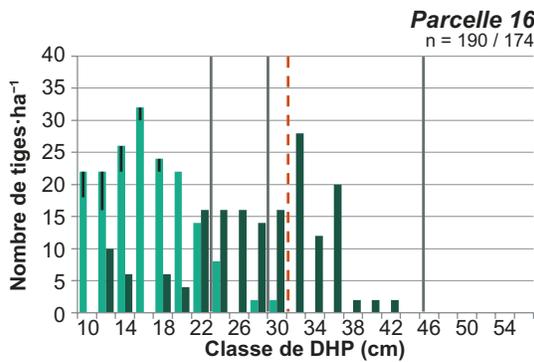
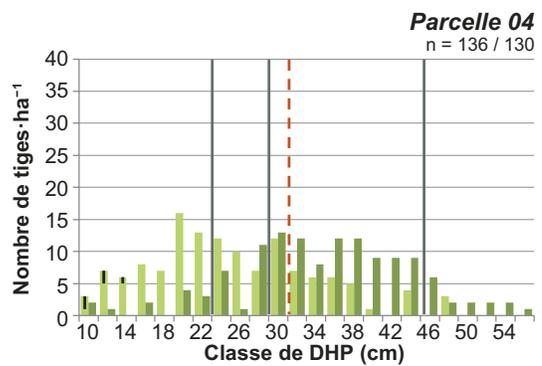
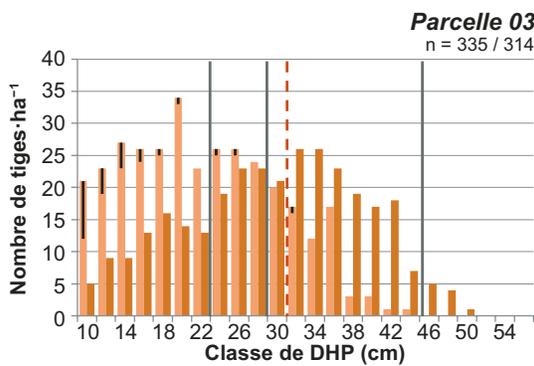
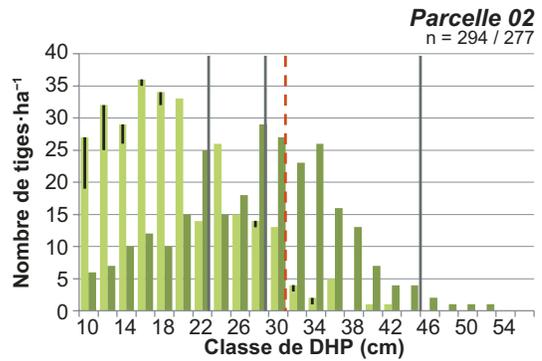
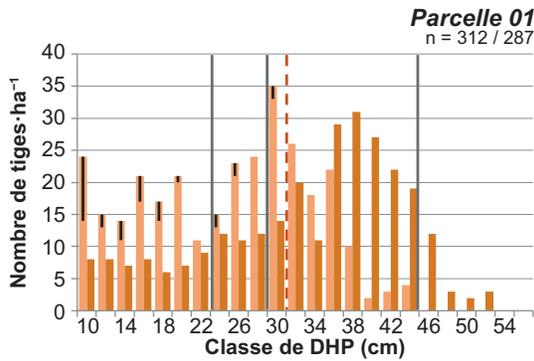
Figure A2.2 Courbes des 3 modèles pour estimer la hauteur totale des pins rouges en fonction de leur DHP, basées sur les données de hauteur et de DHP 25 ans après l'éclaircie.

Annexe 3. Nombre à l'hectare de tiges vivantes de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm) immédiatement après l'éclaircie et 25 ans après l'éclaircie, et nombre de tiges marchandes mortes et recrues, par espèce et par traitement. Les valeurs sont arrondies à l'entier près. Les pourcentages entre parenthèses indiquent les proportions par rapport au nombre total de tiges.

Traitement	Variable	Nombre de tiges vivantes à l'hectare													
		Feuillus*						Résineux							
		Bouleau à papier	Chêne rouge	Érable rouge	Hêtre à grandes feuilles	Peuplier à grandes dents	Peuplier faux-tremble	Total	Épinette blanche	Pin blanc	Pin gris	Pin rouge	Sapin baumier	Total	
EC ₂₃	Après l'éclaircie	27	10	39	1	32	1	108 (19%)	2	119	23	324	5	472 (81%)	580
	Mortes 25 ans	-14	-3	-8	0	-15	-1	-40	-2	-22	-17	-31	-4	-74	-114
	Recrues 25 ans	12	22	26	4	6	0	68	3	17	0	8	33	60	128
	25 ans après l'éclaircie	25	29	57	4	23	0	136 (23%)	3	114	6	301	34	458 (77%)	595
EC ₁₈	Différence après 25 ans	-3	19	18	4	-9	-1	29	1	-5	-17	-23	29	-15	15
		-9%	200%	47%	700%	-29%	-100%	27%	50%	-4%	-74%	-7%	580%	-3%	3%
	Après l'éclaircie	19	14	54	2	46	52	186 (31%)	2	171	17	215	9	413 (69%)	599
	Mortes 25 ans	-9	-2	-9	0	-18	-32	-69	0	-27	-12	-16	-4	-59	-128
EC ₁₃	Recrues 25 ans	13	6	34	5	11	2	69	4	23	0	5	36	67	136
	25 ans après l'éclaircie	23	18	79	7	38	22	187 (31%)	5	167	5	204	41	421 (69%)	607
	Différence après 25 ans	4	5	25	5	-8	-30	1	4	-4	-12	-12	32	8	8
		18%	33%	46%	250%	-16%	-58%	0%	233%	-2%	-73%	-5%	350%	2%	1%
EC ₁₃	Après l'éclaircie	26	2	88	2	16	4	138 (25%)	18	132	22	190	48	410 (75%)	548
	Mortes 25 ans	-10	0	-16	0	-4	-4	-34	-4	-16	-18	-24	-42	-138	-172
	Recrues 25 ans	14	4	46	8	64	6	142	10	24	0	8	178	220	362
	25 ans après l'éclaircie	30	6	118	10	76	6	246 (32%)	24	140	4	174	184	526 (68%)	772
EC ₁₃	Différence après 25 ans	4	4	30	8	60	2	108	6	8	-18	-16	136	116	224
		15%	200%	34%	400%	375%	50%	78%	33%	6%	-82%	-8%	283%	28%	41%

* Le bouleau jaune et l'ostryer de Virginie sont omis du tableau (moins de 1 tige·ha⁻¹ après l'éclaircie et 25 ans après l'éclaircie).

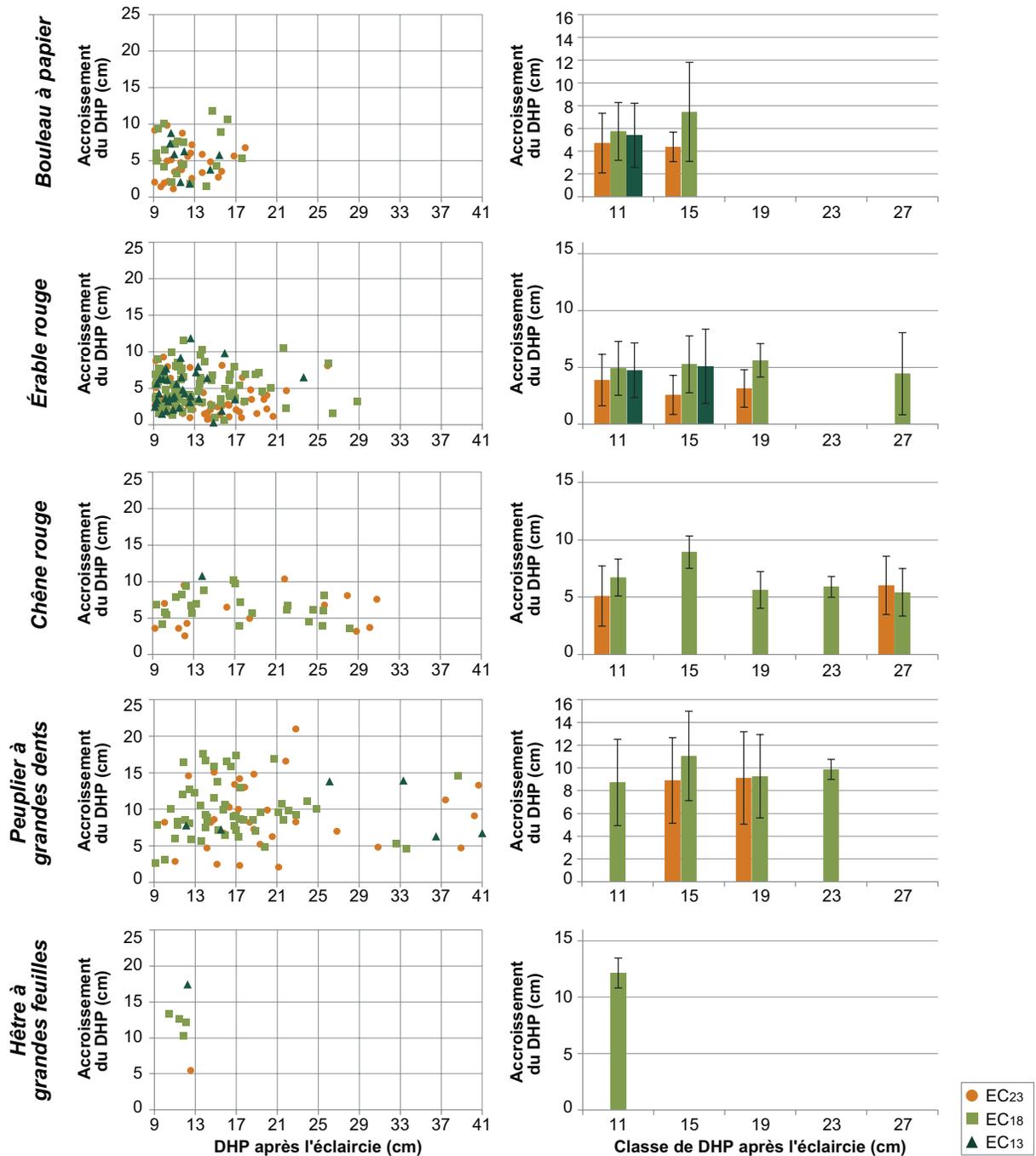
Annexe 4. Distribution du nombre de pins rouges après l'éclaircie et 25 ans après celle-ci, par classe de DHP de 2 cm, dans chacune des parcelles. Les valeurs situées en haut et à droite de chacun des graphiques indiquent le nombre tiges·ha⁻¹ (n = après l'éclaircie / 25 ans après l'éclaircie). Les droites verticales indiquent les seuils de DHP pour les classes de qualité de sciage (en gris) et de poteaux (en rouge). Les valeurs des classes de DHP indiquent la valeur du début de la classe (exemple : la classe de 18 cm comprend les tiges de 18,1 à 20,0 cm).



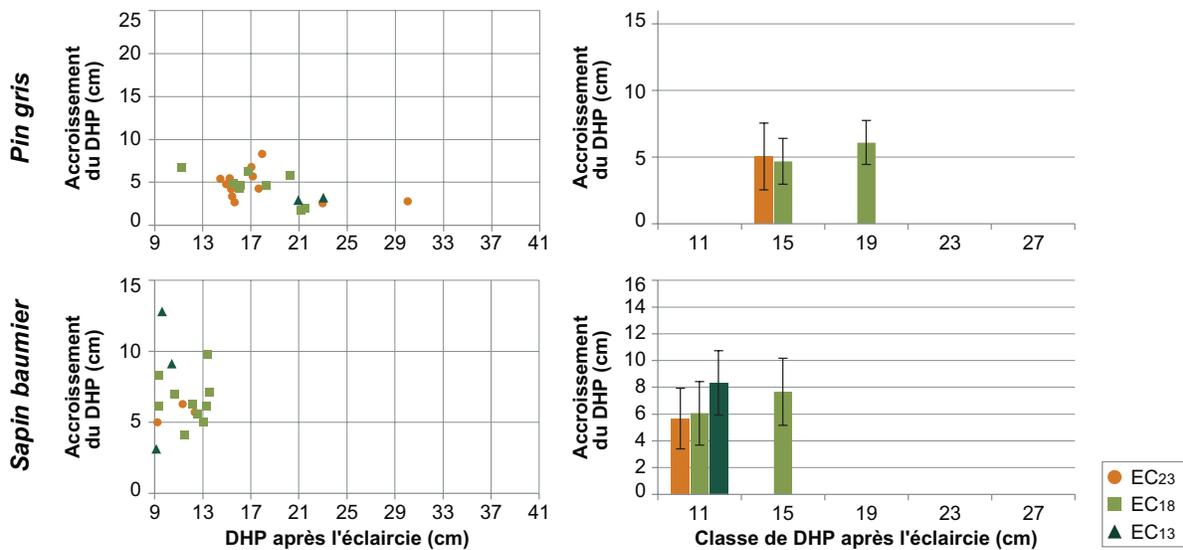
Annexe 5. Nombre de gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm) par hectare 25 ans après l'éclaircie, par espèce, par parcelle et par traitement. Les pourcentages indiquent la proportion du nombre total représenté par chaque groupe d'espèces.

Traitement Parcelle	Nombre de gaules par hectare												
	Feuillus						Résineux						
	Bouleau à papier	Chêne rouge	Érable rouge	Hêtre à grandes feuilles	Peuplier à grandes dents	Peuplier faux-tremble	Total	Épinette blanche	Pin blanc	Pin rouge	Sapin baumier	Total	Total
01	240	520	2272	104	416	8	3560	20	336	3	900	1259	4819
03	264	296	1724	80	568		2932		405	2	1492	1899	4831
Moyenne	252	408	1998	92	492	4	3246	10	371	3	1196	1580	4826
02	372	300	2212	88	564	4	3540	8	116	8	1104	1236	4776
04	120	68	2292	160	244	8	2892	4	42	1	448	495	3387
Moyenne	246	184	2252	124	404	6	3216	6	79	5	776	866	4082
EC13	192	40	2352	160	480	88	3312	8	44	6	1680	1738	5050

Annexe 6. Accroissement en diamètre 25 ans après l'éclaircie en fonction du DHP après l'éclaircie, et moyenne de l'accroissement en diamètre par classe de DHP, le tout par traitement, pour les principales espèces autres que le pin blanc et le pin rouge. Les histogrammes n'incluent que les classes de DHP qui avaient au moins 3 arbres. Les barres d'erreur indiquent l'écart-type de la moyenne.



Annexe 6. (suite et fin)

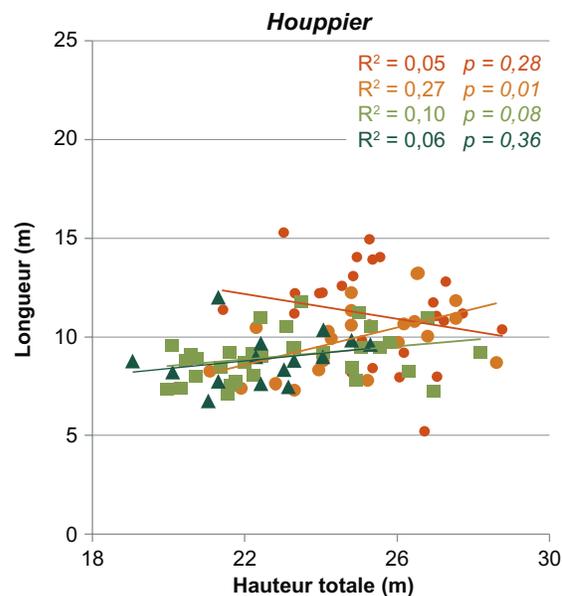
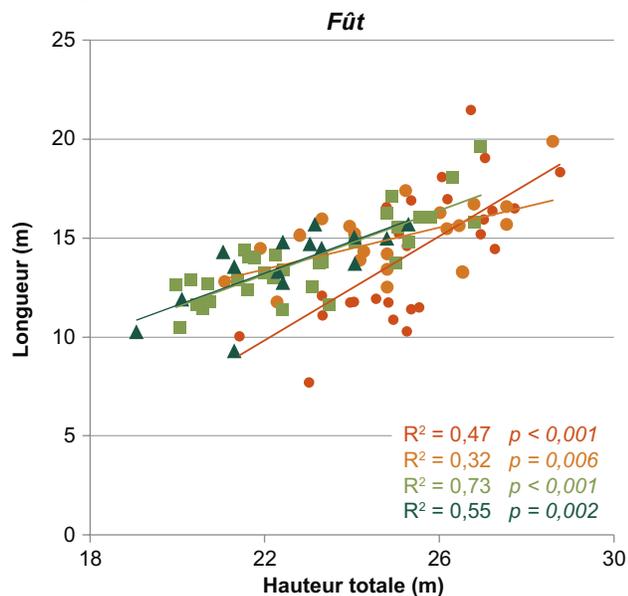


Annexe 7. Surface terrière et proportion des pins rouges présents au départ et coupés lors de l'éclaircie par classe de DHP et par parcelle.

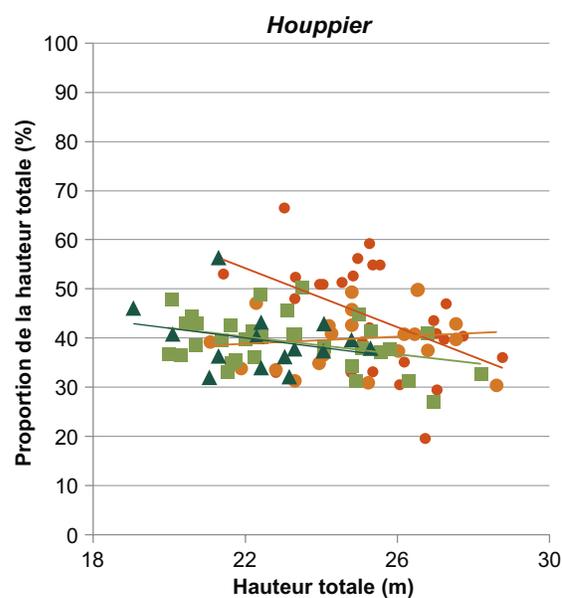
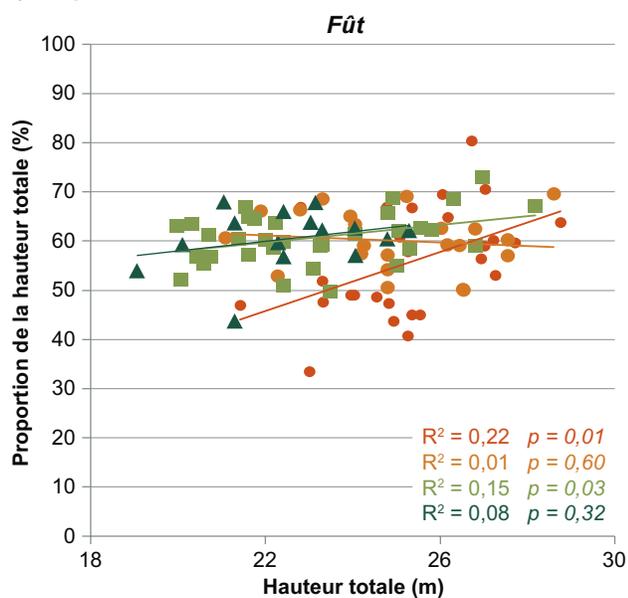
Parcelle	Classe de DHP (cm)	Surface terrière en pin rouge avant l'éclaircie (m ² ·ha ⁻¹)	Proportion prélevée lors de l'éclaircie
01	9,1 à 24,0	3,5	17 %
	24,1 à 32,0	8,6	27 %
	32,1 à 46,0	11,5	23 %
	≥ 46,1	0	—
	Total	23,6	24 %
02	9,1 à 24,2	5,6	14 %
	24,1 à 32,2	4,8	17 %
	32,1 à 46,2	1,5	12 %
	≥ 46,1	0,2	100 %
	Total	12,1	16 %
03	9,1 à 24,1	5,0	10 %
	24,1 à 32,1	7,2	19 %
	32,1 à 46,1	6,6	17 %
	≥ 46,1	0	—
	Total	18,8	16 %
04	9,1 à 24,3	1,9	7 %
	24,1 à 32,3	2,8	8 %
	32,1 à 46,3	3,7	14 %
	≥ 46,1	0,7	24 %
	Total	9,1	12 %
16	9,1 à 24,4	4,2	10 %
	24,1 à 32,4	0,7	0 %
	32,1 à 46,4	0,8	100 %
	≥ 46,1	0	—
	Total	5,7	22 %

Annexe 8. Longueur (a) et proportion (b) du fût et du houppier des pins rouges de DHP $\geq 30,1$ cm en fonction de leur hauteur totale 25 ans après l'éclaircie, selon les traitements : a) longueur du fût et du houppier; b) proportion du fût et du houppier par rapport à la hauteur totale. Les droites de régression sont accompagnées de leur coefficient de détermination R^2 et de la probabilité que la régression soit significative. Le traitement EC23 est illustré pour chacune des 2 parcelles puisque la parcelle 01 montrait des valeurs différentes de la parcelle 3.

a) Longueur

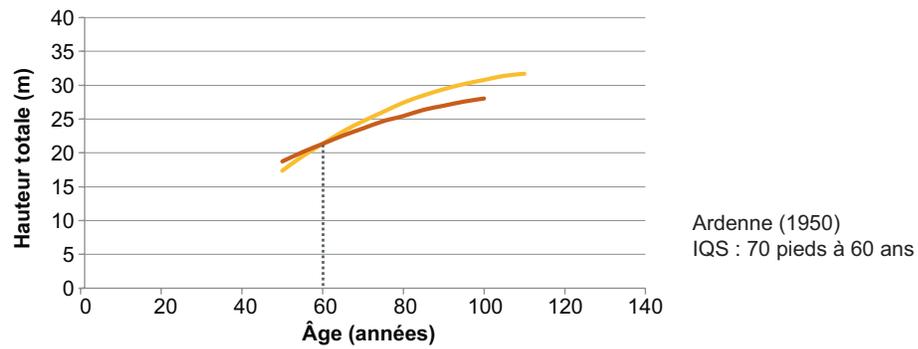
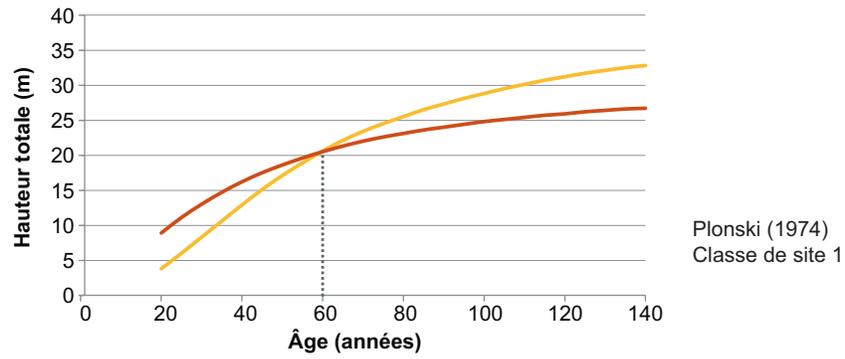
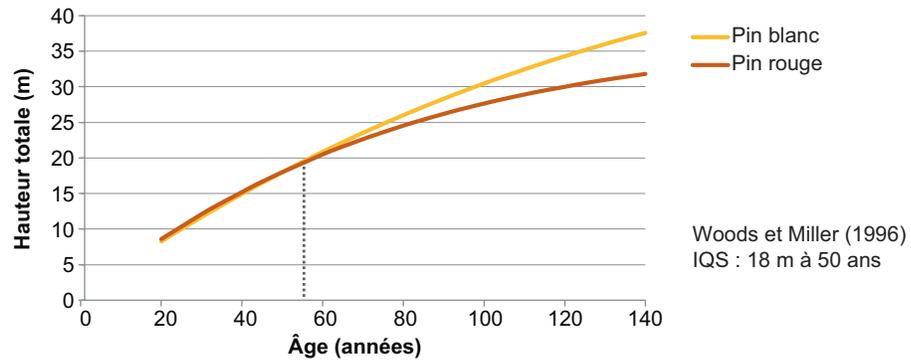


b) Proportion de la hauteur totale

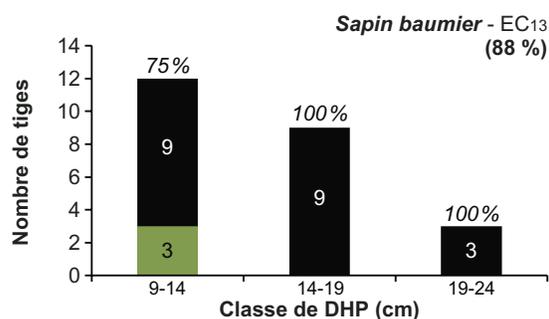
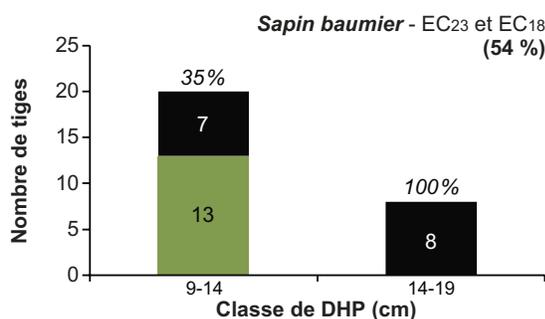
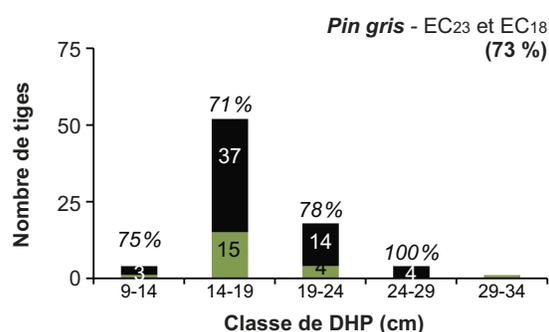
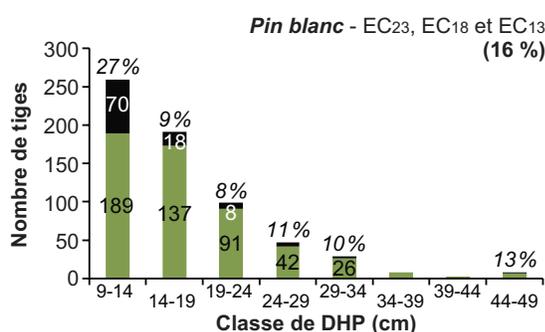
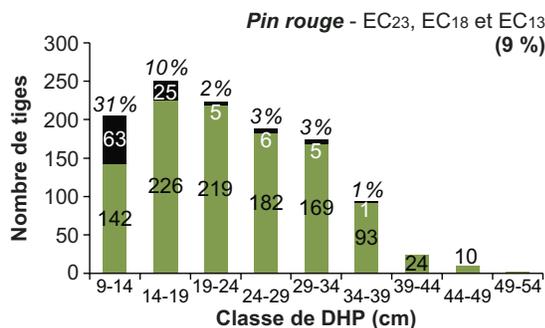


● EC23 (01) ● EC23 (03) ■ EC18 ▲ EC13

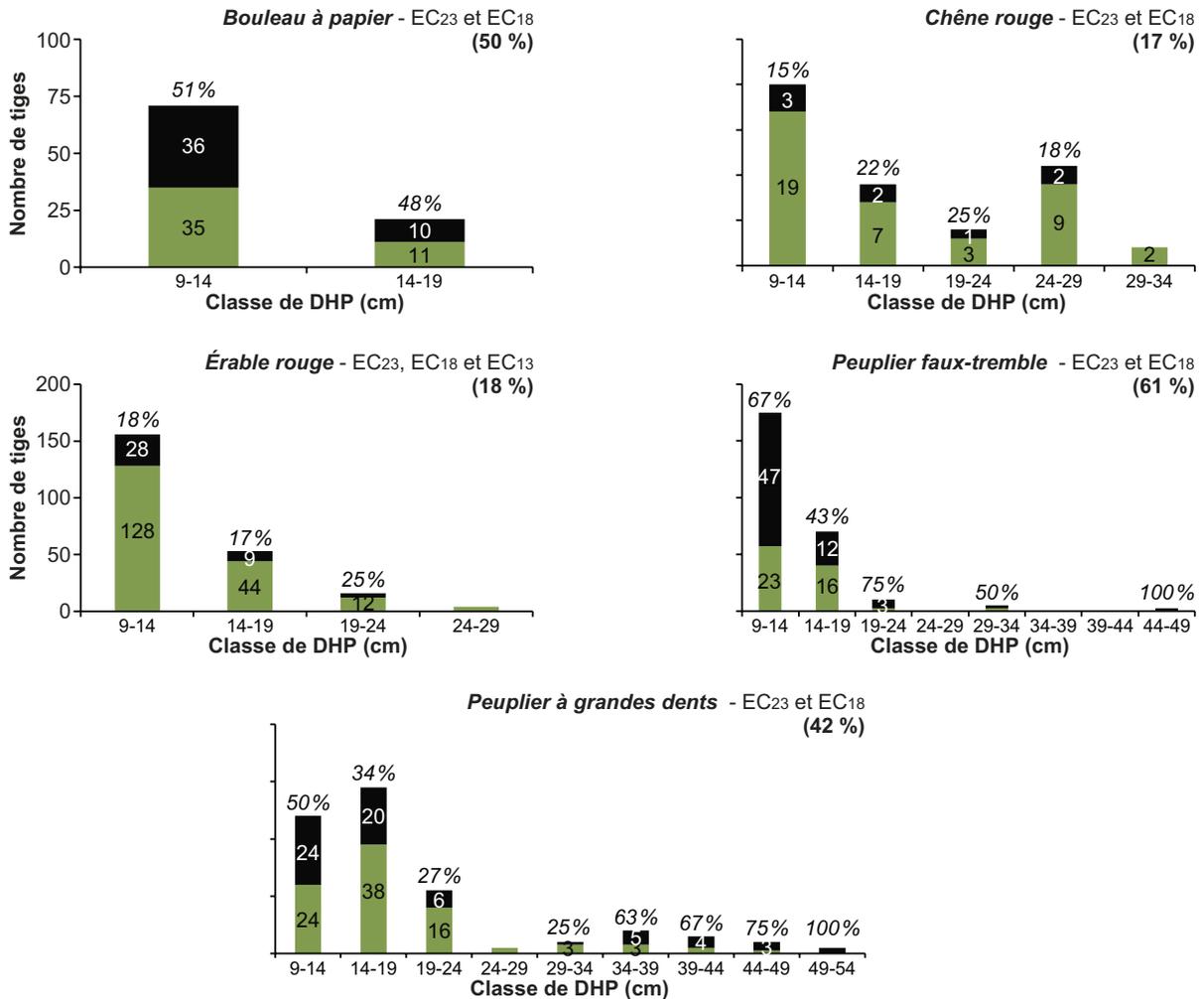
Annexe 9. Comparaison de l'évolution de la hauteur totale en fonction de l'âge pour le pin blanc et le pin rouge, selon 3 études. La ligne verticale pointillée indique l'endroit où les courbes commencent à se distancer l'une de l'autre.

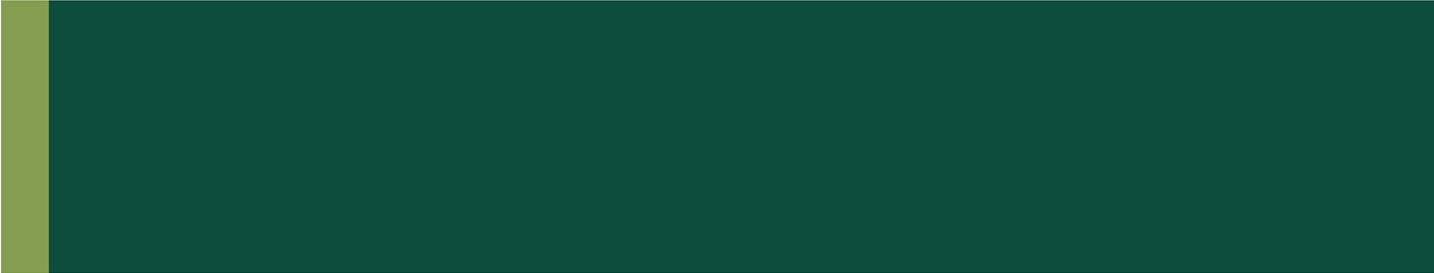


Annexe 10. Nombre de tiges marchandes (DHP $\geq 9,1$ cm) mortes (noir) et survivantes (vert) des espèces de résineux par classe de DHP de 5 cm après l'éclaircie, sur une période de 25 ans. Le pourcentage en haut de chaque colonne indique le taux de mortalité pour cette classe de DHP, et le pourcentage entre parenthèses sous le titre du graphique indique le taux de mortalité pour toutes les classes de DHP (cette valeur peut différer du pourcentage présenté au tableau 3 parce qu'elle n'inclut pas toujours l'ensemble des parcelles). Le traitement EC13 n'est pas inclus lorsque le nombre de classes de DHP représentées était très faible.



Annexe 11. Nombre de tiges marchandes (DHP $\geq 9,1$ cm) mortes (noir) et survivantes (vert) des espèces de feuillus par classe de DHP de 5 cm après l'éclaircie, sur une période de 25 ans. Le pourcentage au-dessus de chaque colonne indique le taux de mortalité pour cette classe de DHP, et le pourcentage entre parenthèses sous le titre du graphique indique le taux de mortalité pour l'ensemble des classes de DHP (cette valeur peut différer du pourcentage présenté au tableau 3 parce qu'elle n'inclut pas toujours l'ensemble des parcelles). Le traitement EC13 n'est pas inclus lorsque le nombre de classes de DHP représentées était très faible.





Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs a comme mandat, entre autres, d'assurer la gestion durable des forêts publiques québécoises. À cette fin, il conçoit et expérimente des traitements sylvicoles qui s'appuient sur l'autécologie des espèces et qui s'inspirent de la dynamique naturelle des forêts. Ces travaux servent notamment à définir les rendements ainsi que les modalités d'application des traitements sylvicoles. Dans ce contexte, la Direction de la recherche forestière poursuit des travaux de recherche sur l'accroissement des forêts de pins après des coupes partielles dans l'ouest du Québec méridional.

Ce mémoire de recherche forestière présente les résultats de croissance et de rendement 25 ans après des éclaircies commerciales pratiquées dans des peuplements de pins rouges âgés de plus de 80 ans situés au nord-ouest de Fort-Coulonge, dans la région de l'Outaouais.