



Éclaircie commerciale de la pinède à pin blanc de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : Résultats 25 ans après la coupe

par Christian Godbout

Mémoire de recherche forestière n° 188
Direction de la recherche forestière

Éclaircie commerciale de la pinède à pin blanc de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : Résultats 25 ans après la coupe

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

Auteur de correspondance : Steve.Bedard@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., 2022. *Éclaircie commerciale de la pinède à pin blanc de la forêt d'expérimentation du Ruisseau-de-l'Indien en Outaouais : Résultats 25 ans après la coupe*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 188. 58 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) : 978-2-550-91049-7
G.F.D.C. 242--015 (714)
L.C. SD 396.5

Note biographique



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

En Outaouais, 2 intensités d'éclaircie ont été pratiquées dans des pinèdes à pin blanc (*Pinus strobus* L.) de structure irrégulière, âgées de plus de 100 ans et issues de coupes de succession au milieu des années 1940. Cette intervention a réduit les surfaces terrières résiduelles moyennes à 23,1 m²·ha⁻¹ (EC₂₃) et à 19,1 m²·ha⁻¹ (EC₁₉). Dans les parcelles témoins (n'ayant subi aucune coupe), la surface terrière moyenne était alors de 37,4 m²·ha⁻¹.

L'accroissement en diamètre du pin blanc au cours des 25 années après l'éclaircie a suivi un gradient, tant selon la surface terrière résiduelle des traitements que selon la grosseur des arbres. Par exemple, pour un arbre dont le DHP (diamètre à hauteur de poitrine) était de 20 cm après la coupe, la moyenne de l'accroissement en diamètre a été de 7,0 cm pour l'EC₁₉, de 4,6 cm pour l'EC₂₃ et de 2,6 cm pour le Témoin. Pour un arbre ayant un DHP de 40 cm après la coupe, ces valeurs ont été de 12,5 cm, 10,1 cm et 8,1 cm, respectivement.

Après 25 ans, malgré une diminution moyenne du nombre de pins blancs de 15 % pour l'EC₁₉ et de 25 % pour l'EC₂₃, la surface terrière en pin blanc a dépassé celle d'avant la coupe (écart moyen de 4,3 m²·ha⁻¹ et de 2,0 m²·ha⁻¹, respectivement). La proportion en surface terrière représentée par les pins blancs de DHP ≥ 42,1 cm (dimension requise pour produire des billes de la meilleure classe de qualité de sciage) a doublé dans tous les traitements, passant en moyenne de 32 % à 62 %.

Dans les parcelles où les peupliers représentaient 20 % ou moins de la surface terrière résiduelle, la production nette en 25 ans de l'ensemble des espèces a été inversement proportionnelle à la surface terrière après la coupe : en moyenne de 11,7 m²·ha⁻¹ pour l'EC₁₉, 9,6 m²·ha⁻¹ pour l'EC₂₃ et 4,8 m²·ha⁻¹ pour le Témoin (0,47 m²·ha⁻¹·an⁻¹,

0,38 m²·ha⁻¹·an⁻¹ et 0,19 m²·ha⁻¹·an⁻¹, respectivement). L'éclaircie a réduit du quart (de 12 % à 3 %) la mortalité des pins blancs dont le DHP après la coupe était de 30 à 45 cm.

Les estimations montrent que la production nette en pins blancs de dimension sciage (DHP ≥ 22,1 cm) a été la plus forte pour l'EC₁₉ : pour une proportion de 80 % de la surface terrière des traitements en pins blancs de DHP ≥ 9,1 cm (dont 80 % de dimension sciage), la production nette en pins blancs de dimension sciage atteindrait 0,45 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour l'EC₁₉, 0,34 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour l'EC₂₃ et 0,26 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour le Témoin. En 25 ans, pour une même surface terrière avant la coupe, les éclaircies généreraient plus de surface terrière (bois récolté lors de la coupe + bois vivant sur pied 25 ans après la coupe) que le Témoin, tant pour l'ensemble des espèces que pour le pin blanc.

Les meilleurs rendements par m² de surface terrière ont été observés chez les pins blancs ayant un DHP de 35 cm pour l'EC₁₉ (0,9 m² produit en 25 ans par m² de surface terrière), de 38 cm pour l'EC₂₃ (0,7 m²·m⁻²) et de 44 cm (0,5 m²·m⁻²) pour le Témoin.

Afin de maximiser le rendement et la valeur de ces pinèdes irrégulières non aménagées de plus de 100 ans, il semble avisé de favoriser la production de pins blancs de grosses dimensions (DHP > 42 cm). Ainsi, lors d'une éclaircie, un maximum de pins blancs de DHP de 30 à 45 cm et exempts de défauts devrait être maintenu sur pied.

Au Québec, des éclaircies successives visant à retarder la coupe finale et à rééquilibrer les classes d'âges des pinèdes à pin blanc semblent adaptées à la croissance du pin blanc. Cette pratique devrait permettre aux pinèdes âgées de conserver une forte production.

Mots-clés : accroissement, éclaircie, mortalité, pin blanc, *Pinus strobus*, recrutement, rendement

Abstract

*In the Outaouais region, thinning at two intensities was carried out in irregularly structured white pine (*Pinus strobus* L.) forests that were over 100 years old and originated from successional cutting in the mid-1940s. On average, thinning left residual basal areas of $23.1 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (EC23 treatment) and $19.1 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (EC19 treatment). The control plot, which was not cut, had an average basal area of $37.4 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$.*

The increase in white pine diameter over the 25-year period after thinning followed a gradient according to treatment residual basal area as well as tree size. For example, for a white pine with a 20 cm DBH (diameter at breast height) after cutting, the average diameter increased respectively by 7.0, 4.6 and 2.6 cm, for EC19, EC23 and Control treatments. For a white pine with a 40 cm DBH after cutting, the increases were 12.5, 10.1 and 8.1 cm.

Twenty-five years after cutting, despite an average decrease in white pine numbers of 15% and 25% for EC19 and EC23 respectively, white pine basal area exceeded pre-cutting values (by an average of $4.3 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ and $2.0 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$). The basal area proportion of white pine with $\text{DBH} \geq 42.1 \text{ cm}$ (required size to produce logs of the best sawn quality) doubled (on average from 32% to 62%) for both the thinned and control plots.

For plots in which residual poplar basal area was 20% or less, the net production of all species over 25 years was inversely proportional to the basal area after cutting: it was on average $11.7 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$, $9.6 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ and $4.8 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ ($0.47 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, $0.38 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ and $0.19 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$) for EC19,

EC23 and Control treatments. Thinning reduced the mortality of white pines with a DBH of 30-45 cm by a quarter (12% to 3%).

Estimates show that the net production of sawn-sized white pine ($\text{DBH} \geq 22.1 \text{ cm}$) was highest for EC19: for a proportion of 80% of the basal area of white pine treatments with $\text{DBH} \geq 9.1 \text{ cm}$ (80% of which is sawn-sized), the net production of sawn-sized white pine would have reached $0.45 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ for EC19, $0.34 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ for EC23 and $0.26 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ for the Control. For an equal basal area before cutting, thinnings would have generated more basal area over 25 years (wood harvested during cutting + standing timber 25 years after cutting) than the Control, whether all species or only white pine are considered.

The best yields per m^2 of basal area were observed in white pines of the 35 cm DBH class for EC19 (0.9 m^2 produced per m^2 of basal area over 25 years), of the 38 cm DBH class for EC23 ($0.7 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) and 44 cm ($0.5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) for the Control.

In order to maximize the yield and value of these irregular and unmanaged pine forests over 100 years of age, it seems advisable to favor the production of large white pines ($\text{DBH} > 42 \text{ cm}$). Thus, during thinning, a maximum of white pines with DBH values of 30 to 45 cm that are free from defects should be kept standing.

Successive thinnings aimed at delaying the final cut and rebalancing the age classes of white pine forests seem adapted to the growth of white pine in Quebec. This practice should allow older pine forests to maintain high production.

Keywords: *growth, mortality, Pinus strobus, recruitment, thinning, white 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 de la terminologie utilisées dans cet ouvrage	xii
Liste des espèces ligneuses mentionnées dans cet ouvrage	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 la coupe	5
1.3.1 Tiges de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm)	5
1.3.2 Gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm).....	5
1.4 Calculs.....	5
1.4.1 Volume marchand brut du pin blanc.....	5
1.4.2 Valeurs minimales de DHP pour chacune des classes de qualité sciage	5
1.4.3 Production	6
1.4.3.1 Terminologie.....	6
1.4.3.2 Comparaison entre les traitements	7
1.4.3.3 Estimation de la production nette en pin blanc de dimension sciage	7
1.5 Analyses statistiques.....	8
1.5.1 Accroissement en diamètre et en surface terrière des pins blancs.....	8
1.5.2 Taux de production par accroissement des pins blancs survivants	8
1.5.3 Taux de mortalité des pins blancs	9
1.5.4 Taux de production interne des pins blancs.....	9
1.5.5 Erreur type d'un quotient de moyennes	9
Chapitre 2 – Résultats	11
2.1 Caractéristiques dendrométriques des parcelles.....	11
2.1.1 Composition en pin blanc des parcelles après la coupe	11
2.1.2 Nombre de tiges après 25 ans.....	11
2.1.2.1 Tiges de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm).....	11
2.1.2.2 Gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm).....	13
2.1.3 Diamètre moyen quadratique après 25 ans.....	13

2.1.4	Surface terrière après 25 ans.....	14
2.1.5	Volume marchand brut du pin blanc après 25 ans.....	14
2.2	Croissance en diamètre du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe.....	14
2.3	Production pour la période de 25 ans suivant la coupe.....	16
2.3.1	Toutes les espèces (tiges de dimension marchande).....	16
2.3.2	Pin blanc.....	18
2.3.2.1	Pins blancs de dimension marchande (DHP \geq 9,1 cm).....	18
2.3.2.2	Pins blancs de dimension sciage (DHP \geq 22,1 cm).....	20
2.3.2.2.1	Production observée.....	20
2.3.2.2.2	Production nette estimée.....	20
2.3.2.3	Taux de production selon la grosseur des pins blancs.....	23
2.3.2.3.1	Taux de production par accroissement des survivants.....	23
2.3.2.3.2	Taux de mortalité.....	23
2.3.2.3.3	Taux de production interne.....	23
2.3.3	Surface terrière cumulative en 25 ans.....	25
Chapitre 3 – Discussion	27
3.1	Dynamique des espèces.....	27
3.2	Croissance des pins blancs.....	27
3.3	Rendements selon les traitements.....	28
3.4	Aménager les pinèdes à pin blanc pour la production de gros pins.....	30
3.5	Éclaircies successives et retardement de la coupe finale.....	30
Conclusion et recommandations	33
Références bibliographiques	35
Annexes	41

Liste des tableaux

Tableau 1. Valeurs minimales estimées du DHP du pin blanc pour chacune des classes de qualité de billes de sciage pour une bille de pied	6
Tableau 2. Variables dendrométriques mesurées dans chaque traitement avant, immédiatement après, 10 ans après et 25 ans après la coupe d'éclaircie, pour les arbres de dimensions marchandes (DHP \geq 9,1 cm) de toutes les espèces et pour le pin blanc	12
Tableau 3. Nombre de tiges vivantes ayant un DHP \geq 9,1 cm après la coupe d'éclaircie et taux de mortalité après 25 ans, par espèce et par traitement	13
Tableau 4. Nombre de tiges par parcelle des espèces du couvert dominant (100 plus grosses tiges à l'hectare) 25 ans après la coupe d'éclaircie, et différence entre ces valeurs et celles après la coupe	14
Tableau 5. Bilan de production par traitement 25 ans après la coupe d'éclaircie, pour l'ensemble les espèces de DHP \geq 9,1 cm, les pins blancs de DHP \geq 9,1 cm et les pins blancs de DHP \geq 22,1 cm	17

Liste des figures

Figure 1.	Dispositif expérimental de la pinède à pin blanc : a) emplacement du dispositif; b) répartition des parcelles et cartographie des dépôts de surface	4
Figure 2.	Proportion en surface terrière du pin blanc, des peupliers, des autres résineux et des autres feuillus dans chacune des parcelles après la coupe	7
Figure 3.	Évolution dans le temps du nombre de tiges de dimension marchande (DHP \geq 9 cm)	11
Figure 4.	Évolution dans le temps du nombre de gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm), par espèce ou groupe d'espèces commerciales et par traitement	15
Figure 5.	Répartition de la surface terrière en pin blanc après la coupe et 25 ans après la coupe, par classe de DHP, pour l'ensemble des traitements	16
Figure 6.	Accroissement du pin blanc par traitement 25 ans après la coupe en fonction du DHP après la coupe	16
Figure 7.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant la coupe, de l'ensemble des espèces de DHP \geq 9,1 cm en fonction de la surface terrière après la coupe	18
Figure 8.	Production périodique annuelle par parcelle des arbres de dimensions marchandes (DHP \geq 9,1 cm) de toutes les espèces et de pin blanc, pour les périodes de 1-10 ans et de 11-25 ans après la coupe	19
Figure 9.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant la coupe, des pins blancs de DHP \geq 9,1 cm en fonction de la proportion de surface terrière après la coupe	21
Figure 10.	Production par parcelle, pour la période de 25 ans après la coupe, des pins blancs de DHP \geq 22,1 cm (dimension sciage) en fonction de la proportion de leur surface terrière après la coupe	22
Figure 11.	Estimation de la production nette des pins blancs de dimension sciage (DHP \geq 22,1 cm) par traitement, pour la période de 25 ans suivant la coupe, en fonction de la proportion de la surface terrière en pins blancs de DHP \geq 9,1 cm après la coupe	23
Figure 12.	Modélisation du taux de production par traitement (m^2 de production pour la période de 25 ans suivant la coupe par m^2 de surface terrière après la coupe) du pin blanc en fonction du DHP	24
Figure 13.	Surface terrière cumulative par parcelle après 25 ans (somme de la surface terrière coupée et de la surface terrière après 25 ans) en fonction de la surface terrière avant la coupe	25
Figure 14.	Production nette en surface terrière (a) et en volume (c), et surface terrière cumulative (coupée et sur pied à 25 ans) 25 ans après la coupe (b) en fonction de la surface terrière après la coupe, pour les parcelles éclaircies et témoins d'une pinède à pin blanc et à pin rouge de 80-90 ans	29

Liste des annexes

Annexe 1. Résultats des analyses statistiques.....	41
1.1. Modélisation de la relation hauteur–DHP	41
1.2. Estimation des paramètres du modèle polynomial de l'accroissement en diamètre du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements	44
1.3. Estimation des paramètres du modèle polynomial de l'accroissement en surface terrière du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements	45
1.4. Estimation des paramètres du modèle polynomial du taux de production de la composante de l'accroissement des survivants des pins blancs, pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements	46
1.5. Estimation des paramètres du modèle polynomial du taux de mortalité en surface terrière du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements	48
1.6. Estimation des paramètres du modèle polynomial du taux de production interne du pin blanc pour la période de 25 ans après la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements	49
Annexe 2. Méthode de calcul pour estimer la production du pin blanc sur une période de 25 ans suivant la coupe pour chacun des traitements, selon les classes de DHP basées sur les dimensions minimales pour la production de billes de sciage	51
2.1 Données nécessaires au calcul	51
2.2 Calcul de la production interne, du recrutement et du transfert de classe	52
2.3 Méthodes de calcul	52
2.4 Exemples de calcul pour le traitement EC23.....	53
Annexe 3. Structure diamétrale du pin blanc après la coupe et 25 ans après la coupe, et mortalité pour la période de 25 ans après la coupe, par classe de DHP, pour chacune des parcelles	55
Annexe 4. Positionnement des parcelles sur un diagramme de densité regroupant les seuils de Leak et Lamson (1999; lignes pointillées grises) et ceux de Smith et Woods (1997; lignes pleines et noires)	56
Annexe 5. Diagramme en boîte à moustaches de la hauteur totale ainsi que de la longueur du houppier, du fût, du fût sans branches et du fût avec branches mortes des pins blancs en fonction du DHP et des traitements, 25 ans après la coupe : a) valeurs absolues; b) valeurs relatives	57
Annexe 6. Proportion du nombre de pins blancs qui ont atteint ou dépassé le seuil de DHP de 42,1 cm 25 ans après la coupe, par classe de DHP après la coupe et par traitement	59

Liste des abréviations et de la terminologie utilisées dans cet ouvrage

ACC SURV	Production par accroissement des arbres survivants.
Après la coupe	Immédiatement après la coupe dans le cas des parcelles éclaircies et au début de l'expérience pour les parcelles témoins.
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (mesuré à 1,3 m du sol).
DHP \geq 9,1 cm	Arbres dont le DHP est de 9,1 cm et plus (arbres marchands). Pour le pin blanc, cela inclut ceux de dimension sciage (DHP \geq 22,1 cm).
DHP \geq 22,1 cm	Arbres dont le DHP est de 22,1 cm et plus; pour le pin blanc, cela correspond aux arbres de dimension sciage, soit ceux pouvant générer des billes de sciage.
DHP_q	DHP moyen quadratique; correspond au DHP d'un arbre dont la surface terrière correspond à la moyenne de celle de l'ensemble des arbres.
EC₁₉	Traitement d'éclaircie de surface terrière résiduelle moyenne de 19,1 m ² ·ha ⁻¹ (parcelles 10, 12 et 15).
EC₂₃	Traitement d'éclaircie de surface terrière résiduelle moyenne de 23,1 m ² ·ha ⁻¹ (parcelles 05, 06, 08 et 09).
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.
Production	Quantité de bois produit sur une superficie donnée.
Production interne	Production par accroissement des survivants soustrait de la mortalité.
Production nette	Différence entre la quantité de bois en fin de période et celle en début de période; synonyme de rendement.
Taux de production	Production obtenue après 25 ans (en m ³) par m ² de surface terrière après la coupe, par classe de DHP; aussi appelé productivité.
Témoin	Traitement où aucune coupe n'a été pratiquée (parcelles 07T, 11T, 13T et 14T).
Témoin PE-	Parcelles témoins 07T et 11T, dont la proportion de peupliers est comparable à celle des parcelles des traitements d'éclaircie.
Témoin PE+	Parcelles témoins 13T et 14T, avec une forte proportion de peupliers.
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 ligneuses mentionnées dans cet ouvrage

Amélanchier sp.	<i>Amelanchier</i> Medikus
Aulne rugueux	<i>Alnus incana</i> subsp. <i>rugosa</i> (Du Roi) R.T. Clausen
Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i> Marshall
Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i> Britton
Cerisier de Pennsylvanie	<i>Prunus pensylvanica</i> Linnæus f.
Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i> Linnæus
Cornouiller à feuilles alternes	<i>Cornus alternifolia</i> Linnæus f.
Épinette blanche	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss
Érable à épis	<i>Acer spicatum</i> Lamarck
Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i> Marshall
Érable de Pennsylvanie	<i>Acer pensylvanicum</i> Linnæus
Érable rouge	<i>Acer rubrum</i> Linnæus
Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i> Marshall
Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrhart
Houx verticillé	<i>Ilex verticillata</i> (Linnæus) A. Gray
Némopanthe mucroné	<i>Ilex mucronata</i> (Linnæus) M. Powell, V. Savolainen & S. Andrews
Noisetier à long bec	<i>Cornus cornuta</i> Marshall
Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i> Linnæus
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> Linnæus
Pin gris	<i>Pinus banksiana</i> Lambert
Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i> Aiton
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i> (Linnæus) Miller
Saule	<i>Salix</i> sp. Linnæus
Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i> Linnæus

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 aussi 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 aussi tous les autres techniciens forestiers, notamment M. Guy Brousseau, lui aussi 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 ainsi que MM. Thierry Arbour, François Berthiaume, Jean-Guy Boissonneault, Dominic Boucher, Pierre Duval, Jocelyn Hamel, Bruno Joly, Éric Mercier, Richard Nadeau, Sylvain Thivierge, sans compter 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 la coupe. Mes remerciements s'adressent également au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec pour avoir autorisé l'établissement des 2 parcelles témoins dans la Réserve écologique du Ruisseau-de-l'Indien, de même que leur mesurage répété.

Je remercie M^{me} Lise Charette, statisticienne à notre Direction, pour les analyses statistiques et la description des méthodes, texte que j'ai adapté dans le présent mémoire; je lui en suis très reconnaissant et entièrement redevable. Je remercie également M. Jean Noël, technicien spécialisé en géomatique, et M^{me} Véronique Poirier, technicienne spécialisée en géomatique, pour les illustrations de la figure 1. Je tiens à remercier M. Marcel Prévost (prélecture), M. Michel Huot et un réviseur anonyme (évaluation du mémoire), ainsi que M. Steve Bédard (responsable de la révision scientifique), pour leur dévouement et leur patience à relire ce volumineux document, et pour leurs commentaires et suggestions qui ont contribué à améliorer ce document. Enfin, mes remerciements s'adressent à l'équipe de transfert et de diffusion de connaissances de la Direction de la recherche forestière, en particulier M^{me} Denise Tousignant et M. Alexandre Dallaire-Théroux pour l'édition du document, ainsi qu'à M^{me} Maripierre Jalbert de la Direction des communications 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 nos R82411 (début : 1984; titulaire initial : Jean-Louis Brown), 0904 140S, 112310019 et enfin, l'actuel projet n° 142332019.

Introduction

L'ensemble des forêts de pin blanc occupent aujourd'hui moins de 1 % du territoire forestier québécois. Malgré sa faible abondance, on continue de rechercher le pin blanc pour son bois d'œuvre (BFEC 2009). Les possibilités forestières en volume marchand brut (VMB) du pin blanc et du pin rouge sont évaluées à près de 450 000 m³/an, soit 1,3 % des possibilités forestières du Québec (BFEC 2019). Deux régions se partagent plus de 80 % des possibilités forestières en pin blanc : l'Outaouais (50 %) et l'Abitibi-Témiscamingue (31 %).

Jusqu'au milieu des années 1980, la coupe à diamètre limite était la coupe partielle la plus pratiquée au Québec dans les pinèdes à pin blanc. Avec l'adoption d'un nouveau régime forestier en 1986, elle a été progressivement délaissée au profit d'autres types de coupes avant d'être abandonnée définitivement à partir de 1995 (Brown 1994a), puisqu'elle représentait davantage une méthode pour contrôler la récolte que pour aménager la forêt (Huot 1987). Actuellement, l'éclaircie commerciale est la coupe partielle la plus pratiquée dans les pinèdes à pin blanc de l'Outaouais (MFFP 2018a).

Au Québec, environ 60 % des pinèdes à pin blanc ont 120 ans et plus, et les peuplements de 30 et 50 ans sont presque inexistantes (Nappi 2013). L'éclaircie commerciale pratiquée dans ces pinèdes âgées constitue un moyen d'étaler dans le temps la récolte de pin blanc et de retarder la coupe finale afin de mieux régulariser les classes d'âge de ces pinèdes. Cet étalement comporte plusieurs avantages, y compris le maintien de peuplements matures comportant des arbres de forts diamètres (un enjeu en forêt décidue tempérée), la récolte d'un plus grand volume en arbres de fortes dimensions et de plus grande valeur marchande, et une meilleure répartition dans le temps des superficies en régénération (Nappi 2013). Cette approche d'étalement peut aussi créer une plus grande hétérogénéité dans les peuplements, par la rétention d'arbres âgés, de même que sur un territoire, par l'ajout de peuplements à structure d'âge avancé (Seymour et Hunter 1999). Cet étalement peut aussi servir à stocker plus de carbone dans les peuplements forestiers (Harmon et Marks 2002).

Puisque l'éclaircie est généralement pratiquée en bas âge afin de gérer la densité et la croissance des arbres, les études sur l'éclaircie du pin blanc ont souvent été réalisées dans des plantations

âgées de 20 à 40 ans (p. ex. Casselman *et al.* 2007, Guiterman *et al.* 2011, Hunt et Mader 1970, McNab et Ritter 2000) ou dans des peuplements naturels âgés de 25 à 65 ans (Desmarais et Leak 2005, Gillespie et Hocker 1986a, 1986b, Hawley 1927, 1936, Heiberg 1945, Leak et Yamasaki 2013, Streit 1991, Wile 1955). À la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, plusieurs auteurs font état des résultats obtenus dans des parcelles éclaircies et témoins établies dans des peuplements de pins blancs de 40 à 80 ans (Berry 1959, Bowen 1962, Burgess et Robinson 1998, Logan 1950, Smithers 1954). Pour les pinèdes plus âgées, Morneault *et al.* (2010) en Ontario, Huot et Lemieux (2003) au Québec, et Nicholson et Ward (1995) au Connecticut, font brièvement état du rendement de coupes partielles après 5 ou 10 ans. De leur côté, Bebbler *et al.* (2004), en Ontario, ont étudié la croissance en diamètre des pins blancs sur une période de 8 ans après des coupes partielles dans des peuplements de plus de 200 ans. Deux études présentent les résultats de différentes intensités d'éclaircie pour des peuplements âgés. Celle d'Anderson *et al.* (1984) en Ontario présente brièvement les résultats après 25 ans de plusieurs types d'éclaircies (surfaces terrières résiduelles : de 16 à 26 m²·ha⁻¹) pratiquées dans une pinède à pin blanc et à pin rouge âgée de 80 à 90 ans. Au Minnesota, Anderson *et al.* (2002), Buckman et Zasada (1960) et Schlaegel (1971) présentent des résultats détaillés d'une étude échelonnée sur 43 ans, dans laquelle 4 valeurs de surface terrière résiduelle (18, 23, 28 et 32 m²·ha⁻¹), maintenues dans le temps par des éclaircies successives, ont été comparées dans une pinède à pin blanc pure âgée au départ de 80 ans.

En 1987, la Direction de la recherche forestière a mis en place un dispositif expérimental sur l'éclaircie commerciale dans des pinèdes à pin blanc et des pinèdes à pin rouge. Ce dispositif avait pour but d'apporter des connaissances nécessaires à l'aménagement optimal de ces forêts et de préciser l'intensité d'éclaircie qui permettrait d'en maximiser le rendement (Brown 1994b). La description du dispositif expérimental, les caractéristiques dendrométriques de la forêt avant et après la coupe, ainsi que les données de récolte ont été consignées par Brown (1994b), alors que les résultats de la croissance et du rendement 10 ans après la coupe ont été présentés par Godbout (2016). Le présent mémoire fait état de la croissance et du rendement 25 ans après l'éclaircie. Encore à ce jour, il constitue

l'une des rares études présentant des résultats à long terme d'éclaircies commerciales pratiquées dans des pinèdes à pin blanc âgées. Plus précisément, les objectifs du présent document sont les suivants :

- 1- Connaître les changements dans la composition des pinèdes à la suite des éclaircies;
- 2- Évaluer la croissance en diamètre des pins blancs selon leur DHP initial;
- 3- Évaluer les traitements quant à leur rendement total, en pin blanc et en pin blanc de dimension sciage, et analyser l'apport des différentes composantes de la production (accroissement des survivants, mortalité et recrutement);

- 4- Déterminer les diamètres de pin blanc les plus productifs en fonction des traitements;
- 5- Comparer la croissance en diamètre et le rendement durant la période 11-25 ans après l'éclaircie à celle durant la période précédente (de 1 à 10 ans).

L'aménagement de ces pinèdes âgées par éclaircies successives dans le but de retarder la coupe finale afin de régulariser les classes d'âge de ces peuplements au Québec est discuté, en particulier quant à l'effet d'un tel scénario sur la production au fil du temps. Des recommandations sur la pratique de l'éclaircie dans de telles pinèdes sont aussi formulées.

Chapitre 1 – Matériel et méthodes

Cette section présente des informations succinctes sur l'emplacement du site d'étude, le dispositif expérimental, les informations associées au mesurage 25 ans après la coupe et les calculs effectués dans le cadre du présent ouvrage. Cependant, il est vivement conseillé au lecteur de se référer aux ouvrages de Brown (1994b) et de Godbout (2016) pour de plus amples informations sur le site d'étude, le dispositif expérimental, la coupe d'éclaircie ainsi que les mesurages effectués avant la coupe, immédiatement après la coupe ainsi que 10 ans après la coupe.

Dans le reste de ce document, afin d'alléger le texte, l'expression « après la coupe » sera utilisée en référence aux valeurs observées immédiatement après la coupe dans le cas des parcelles éclaircies, de même qu'aux valeurs observées en début d'expérience pour les parcelles témoins.

1.1 Site d'étude

Cette forêt du domaine public 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 (figure 1a). Elle est issue de coupes de succession effectuées au milieu des années 1940, qui visaient à enlever le couvert mature de peupliers (*Populus* sp.) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) afin de libérer le pin blanc présent en sous-étage. Le relief est composé principalement de replats formés par des levées de plages constituées de sables fins et moyens. 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 1000 mm, avec une fraction nivale de 25 %. L'indice de qualité de station serait de 18-19 m à 50 ans (Godbout 2016).

1.2 Dispositif expérimental

Au total, 11 parcelles ont été établies en 1987 avant la coupe (figure 1b). Les parcelles sont de 2 grandeurs et formes différentes : les parcelles 05 à 13T sont carrées et mesurent 100 m × 100 m (1 ha), alors que les parcelles 14T et 15 sont rectangulaires et mesurent 50 m × 100 m (0,5 ha). Les parcelles 07T, 11T, 13T et 14T ont été exclues de la

coupe et conservées comme témoins. Chacune des parcelles a été subdivisée en sous-parcelles carrées de 10 m × 10 m, lesquelles ont été subdivisées à leur tour en sous-sous-parcelles carrées de 5 m × 5 m.

À l'origine, le dispositif expérimental comportait des blocs de coupe avec des surfaces terrières résiduelles de 15, 20, et 25 m²·ha⁻¹, dans lesquels des parcelles éclaircies et témoins étaient distribuées (Brown 1994b). Toutefois, les résultats après la coupe ont montré que les surfaces terrières résiduelles des parcelles éclaircies 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 était de comparer différentes surfaces terrières résiduelles, les parcelles éclaircies ont été regroupées *a posteriori* selon 2 niveaux de surface terrière après la coupe :

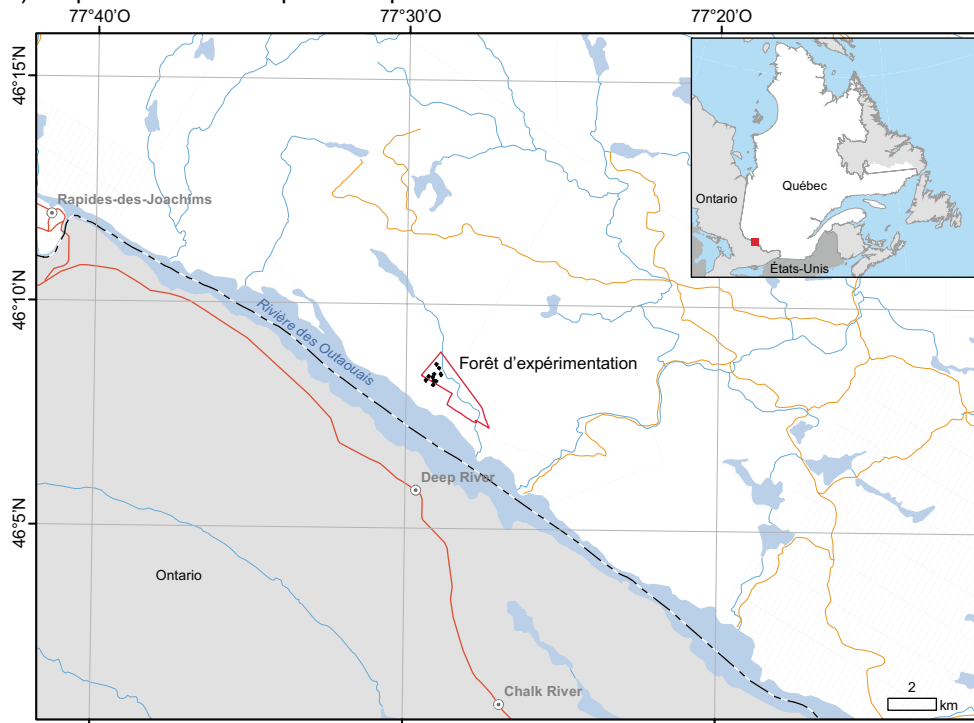
- **EC19**, avec une surface terrière résiduelle moyenne de 19,1 m²·ha⁻¹ : parcelles 10 (19,7 m²·ha⁻¹), 12 (18,9 m²·ha⁻¹) et 15 (18,6 m²·ha⁻¹);
- **EC23**, avec une surface terrière résiduelle moyenne de 23,1 m²·ha⁻¹ : parcelles 05 (22,2 m²·ha⁻¹), 06 (23,2 m²·ha⁻¹), 08 (24,1 m²·ha⁻¹) et 09 (22,9 m²·ha⁻¹).

Quant aux parcelles témoins (**Témoin**), leur surface terrière moyenne était de 37,4 m²·ha⁻¹ : parcelles 07T (35,0 m²·ha⁻¹), 11T (37,5 m²·ha⁻¹), 13T (38,6 m²·ha⁻¹) et 14T (38,6 m²·ha⁻¹).

Ces regroupements après l'éclaircie ont fait en sorte que les 4 parcelles de l'EC23 se sont retrouvées spatialement groupées (figure 1b). Les 3 parcelles de l'EC19 présentaient, avant même que la coupe soit effectuée, une surface terrière en pin blanc plus faible que l'EC23 (voir le tableau 2 à la section 2.1.2.1). De plus, 2 des 3 parcelles de l'EC19 présentaient une composition plus importante en feuillus durs (Godbout 2016) et se situaient à la jonction de 2 types de dépôt (figure 1b). Ces particularités peuvent avoir influencé la croissance et le rendement et nuire à l'interprétation de l'effet des traitements.

Comme 9 des 11 parcelles ont une superficie de 1,0 ha, les valeurs à l'hectare pour ces parcelles représentent les valeurs telles qu'observées sur une portion de forêt d'1 hectare; elles ne résultent donc pas d'un regroupement des valeurs de plusieurs parcelles. En ce sens, ces valeurs représentent de « vraies » valeurs à l'hectare.

a) Emplacement du dispositif expérimental



b) Répartition des parcelles et cartographie des dépôts de surface

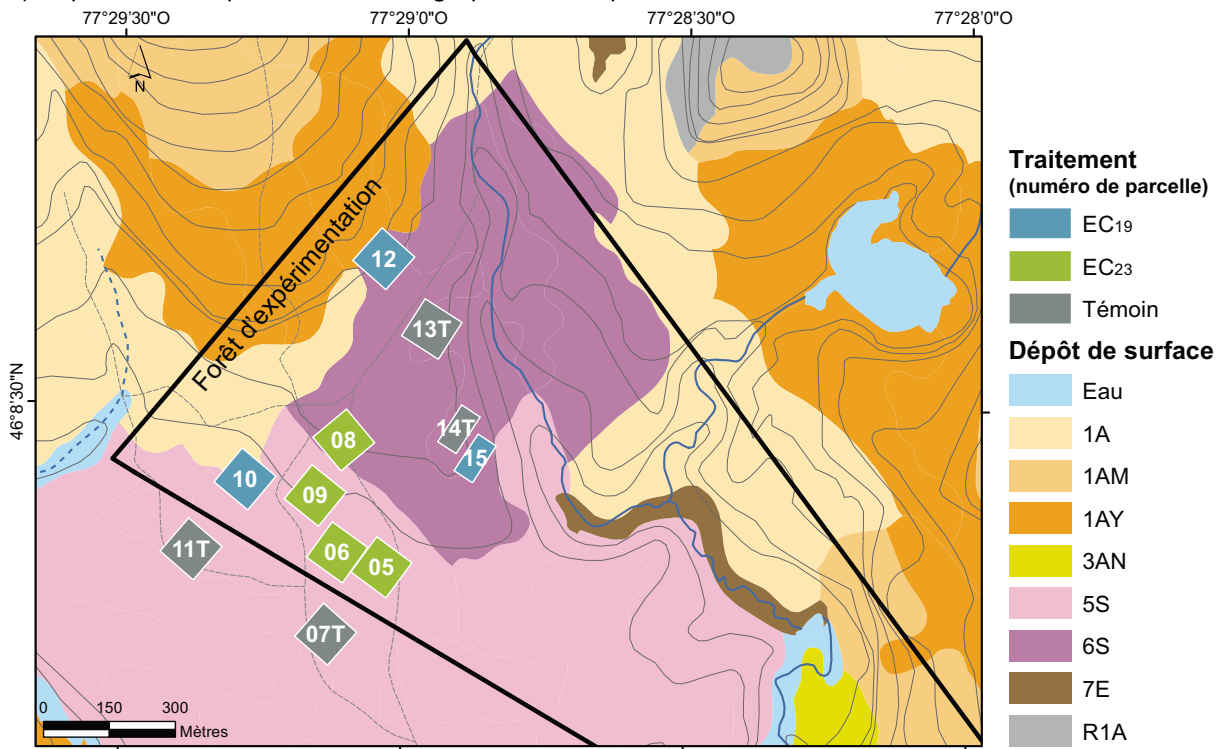


Figure 1. Dispositif expérimental de la pinède à pin blanc : a) emplacement du dispositif; b) répartition des parcelles et cartographie des dépôts de surface. Les carrés et rectangles représentent les parcelles, colorées selon les traitements et numérotées : EC19 = éclaircie avec surface terrière résiduelle moyenne de 19 m²·ha⁻¹; EC23 = éclaircie avec surface terrière résiduelle moyenne de 23 m²·ha⁻¹; Témoin = aucune coupe. Dépôts de surface : 1A = till indifférencié épais (épaisseur modale > 1 m); 1AY = till indifférencié d'épaisseur moyenne (épaisseur modale de 50 cm à 1 m); 5S = dépôt marin d'eau peu profonde constitué de sable et parfois de gravier, généralement bien triés; 6S = dépôt littoral marin mis en place par les vagues, qui marquent les niveaux autrefois atteints par la mer, avec dépôt composé de sable, de gravier et de cailloux bien triés et stratifiés (MFFP 2015).

1.3 Mesurage 25 ans après la coupe

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 tiges recrues (tiges de DHP < 9,1 cm lors du dernier mesurage 10 ans après la coupe qui ont dépassé ce seuil durant la période de 11-25 ans après la coupe) qui étaient mortes n'ont donc pas été mesurées. L'identification de l'espèce a été notée pour les nouvelles tiges (recrues), et vérifiée pour les tiges qui avaient déjà été mesurées lors des mesurages précédents. Dans chacune des parcelles, la hauteur totale, la hauteur de la première branche (morte ou vivante) d'importance ainsi que celle de la base du houppier ont été mesurées sur le plus gros pin blanc dans 25 sous-parcelles échantillons bien réparties sur l'ensemble de la surface 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 tiges ayant des DHP compris entre 1,1 et 9,0 cm ont été dénombrées par classe de 2 centimètres (cm) à l'aide d'un gabarit. Les pins blancs, les pins gris et les pins rouges ont été dénombrés dans toutes les sous-sous-parcelles des parcelles (taux d'échantillonnage de 100 %), alors que les autres espèces ont été dénombrées seulement dans la sous-sous-parcelle du coin supérieur gauche de chacune des sous-parcelles (taux d'échantillonnage de 25 %).

1.4 Calculs

1.4.1 Volume marchand brut du pin blanc

Le VMB du pin blanc a été calculé en utilisant le tarif de cubage de Perron (2003). Une relation hauteur-DHP a été calculée à partir des mesures de DHP et de hauteur totale effectuées sur 251 pins blancs lors du mesurage 25 ans après la coupe. Trois modèles ont été testés. Même si celui de Chapman-Richards (Richards 1959) était globalement un peu plus performant que les 2 autres, c'est le modèle logarithmique qui a été retenu, car il ne fait pas intervenir une hauteur maximale, contrairement au modèle de Chapman-Richards, qui pouvait ainsi sous-estimer la hauteur des plus gros pins blancs (annexe 1.1). L'équation utilisée pour la relation hauteur-DHP a donc été la suivante :

$$H = -12,646 - 2,066 \times Z + 11,539 \times \ln(DHP)$$

où

H = hauteur totale (m),

DHP = DHP (cm) et

Z est une variable « traitement » dont la valeur est fixée à 1 pour le traitement EC₁₉ et à 0 pour les traitements EC₂₃ et Témoin.

Cette équation pour calculer la hauteur a aussi été utilisée pour estimer le volume des pins blancs pour les 2 mesurages précédents (avant la coupe et 10 ans après la coupe), en fixant $Z = 0$ pour tous les traitements.

1.4.2 Valeurs minimales de DHP pour chacune des classes de qualité sciage

Dans le manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État, 3 classes de qualité pour les billes de sciage de pin blanc sont définies, soit les classes G, H et I (Boulianne 2019). Pour chacune de ces classes, un diamètre minimal sans écorce au fin bout et une longueur minimale sont définis : pour la classe de qualité G, ce diamètre est de 36 cm pour une bille d'au moins 3,7 m de longueur; pour la classe H, il est de 24 cm pour une bille d'au moins 3,1 m; enfin, pour la classe I, il est de 20 cm pour une bille d'au moins 2,5 m. Afin de regrouper les grosseurs de pin blanc selon les dimensions de ces 3 classes de qualité, le DHP avec écorce correspondant aux valeurs minimales de diamètre au fin bout pour la longueur minimale exigée de chacune des classes de qualité a été calculé, en appliquant ces critères à la bille de pied.

Les équations de défilement avec écorce de Li *et al.* (2012) ont été utilisées pour estimer le DHP minimal associé à chacune des classes de qualité. Les données ayant servi à bâtir ces équations proviennent de mesures effectuées sur 1511 pins blancs provenant de l'Ontario, du Québec, et du Nouveau-Brunswick.

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. Les valeurs avec écorce du diamètre au fin bout ont été calculées en utilisant l'équation de Perron (2003) reliant le DHP sans écorce au DHP avec écorce du pin blanc. En supposant que la bille débute à 0,3 m à partir du sol, la hauteur minimale du fin bout des tronçons à partir du sol est respectivement de 4,0 m, 3,4 m et 2,8 m pour les classes G, H et I. La hauteur totale a été estimée à partir du DHP par une relation logarithmique appliquée à un

jeu de données de hauteur et de DHP prises à la 25^e année après la coupe sur 123 pins blancs ayant des DHP de 11 à 45 cm et provenant des 11 parcelles de la pinède à pin blanc de la présente étude. L'équation résultante est :

$$H = -15,8734 + 12,329 \times \ln(DHP) \quad (R^2 = 0,85)$$

où

H = hauteur totale à partir du sol (m) et

DHP = DHP (cm).

Les valeurs minimales de DHP calculées pour chacune des classes de qualité sont présentées au tableau 1. Elles ont été arrondies aux valeurs supérieures suivantes : 22,1 cm, 27,1 cm et 42,1 cm pour les classes I, H et G, respectivement. Les classes de DHP minimales correspondant aux classes de qualité de billes de sciage sont donc de 22,1 à 27,0 cm pour la classe I, de 27,1 à 42,0 cm pour la classe H et de $\geq 42,1$ cm pour la classe G.

1.4.3 Production

1.4.3.1 Terminologie

La production est définie comme la quantité de bois, exprimée en nombre de tiges, en surface terrière ou en volume, produite par les arbres de DHP $\geq 9,1$ cm pour une surface de référence de 1 ha et au cours d'une période de temps donnée. Elle se subdivise en 3 composantes :

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

pour la production. La mortalité a été calculée en utilisant la valeur du DHP en début de période, et non celle en fin de période. Ainsi, l'accroissement en diamètre d'un arbre qui aurait crû durant plusieurs années avant de mourir en cours de période n'a pas été comptabilisé. Cela n'affecte pas la valeur de la production nette, mais influence de façon équivalente les valeurs des composantes de la production par accroissement des survivants et de la mortalité;

- Le **recrutement** est défini 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. Elle constitue un gain pour la production et représente l'apport de bois issu d'arbres de petits diamètres. Les recrues mortes en fin de période n'ont pas été comptabilisées dans les calculs.

À partir de ces 3 composantes de base, 2 regroupements ont été réalisés :

- La **production interne** représente la production générée par les arbres vivants de DHP $\geq 9,1$ cm présents en début de période, sans tenir compte de l'apport externe dû au recrutement. Elle est calculée en soustrayant la mortalité de la production par accroissement des arbres survivants. Si elle est négative, cela indique que la mortalité a été plus importante que l'accroissement, et *vice-versa*;
- La **production nette** est le rendement de la forêt, c'est-à-dire les gains (production par accroissement des survivants + recrutement) moins les pertes (mortalité), ou 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 pour l'ensemble des espèces, celui pour les pins de dimension marchande (DHP $\geq 9,1$ cm) et celui pour ceux de dimension sciage

Tableau 1. Valeurs minimales estimées du DHP du pin blanc pour chacune des classes de qualité de billes de sciage pour une bille de pied (Boulianne 2019).

Classe de qualité	Longueur minimale des tronçons à partir du sol (m)	Diamètre minimal sans écorce au fin bout (cm)	Valeurs minimales estimées du DHP (cm)	Valeurs minimales de DHP utilisées (cm)
I	2,8	19,1	21,6	22,1
H	3,4	23,1	26,7	27,1
G	4,0	35,1	42,0	42,1

(DHP \geq 22,1 cm) ont aussi été calculés. Pour cette dernière classe de DHP, le recrutement correspond aux pins dont le DHP était plus petit que 22,1 cm en début de période et qui ont atteint un DHP d'au moins 22,1 cm en cours de période; il représente l'apport de bois issu d'arbres de petits diamètres pour cette classe de DHP.

1.4.3.2 Comparaison entre les traitements

Comme la proportion de la surface terrière en pin blanc des parcelles variait selon les traitements, la valeur moyenne de la production en pin blanc n'est pas un bon estimateur pour comparer les traitements. Idéalement, il aurait été souhaitable d'avoir à peu près les mêmes proportions de pin blanc pour tous les traitements afin d'être en mesure de bien évaluer les différences entre ceux-ci. Comme ce n'était pas le cas, il a été supposé que, pour un même traitement, la production en pin blanc augmentait de façon linéaire en fonction de la proportion de pin blanc. Ainsi, les traitements ont été comparés par des droites de régression passant par l'origine et reliant la production en pin blanc des parcelles de chaque traitement à leurs proportions (en surface terrière) en pin blanc après la coupe, calculées avec le logiciel Microsoft Excel.

Le Témoin comptait 4 parcelles dans lesquelles les proportions en peupliers différaient grandement. Comme ces proportions en peupliers ont influencé la production, les parcelles avec des proportions en peupliers nettement plus élevées que celles des traitements d'éclaircie ont été distinguées de celles qui présentaient des proportions similaires. Ainsi, le Témoin « PE+ » regroupe les parcelles 13T et 14T qui présentent une proportion très forte de peupliers (37 % et 55 %), et le Témoin « PE- » regroupe les parcelles 07T et 11T qui présentent des proportions en peupliers (1 % et 14 %) ne dépassant pas celle des parcelles éclaircies (figure 2). Les productions des traitements d'éclaircie et du Témoin ont été comparées en tenant compte de ces regroupements.

1.4.3.3 Estimation de la production nette en pin blanc de dimension sciage

La production en pin blanc de dimension sciage est influencée tant par la proportion de pin blanc des parcelles que par leur distribution diamétrale, puisque le taux de production varie en fonction de leur grosseur (voir la section 2.3.2.3). La valeur de la production des traitements obtenue à partir des valeurs de leurs parcelles contient donc une variabilité liée à leur proportion respective en pin blanc et

Autres feuillus	9 %	17 %	20 %	2 %	5 %	5 %	8 %	6 %	5 %	4 %	6 %
Autres résineux	11 %	6 %	17 %	7 %	5 %	13 %	4 %	10 %	18 %	8 %	3 %
Peupliers	2 %	11 %	15 %	2 %	8 %	6 %	20 %	1 %	14 %	37 %	55 %
Pin blanc	77 %	67 %	48 %	89 %	82 %	76 %	69 %	83 %	64 %	52 %	37 %

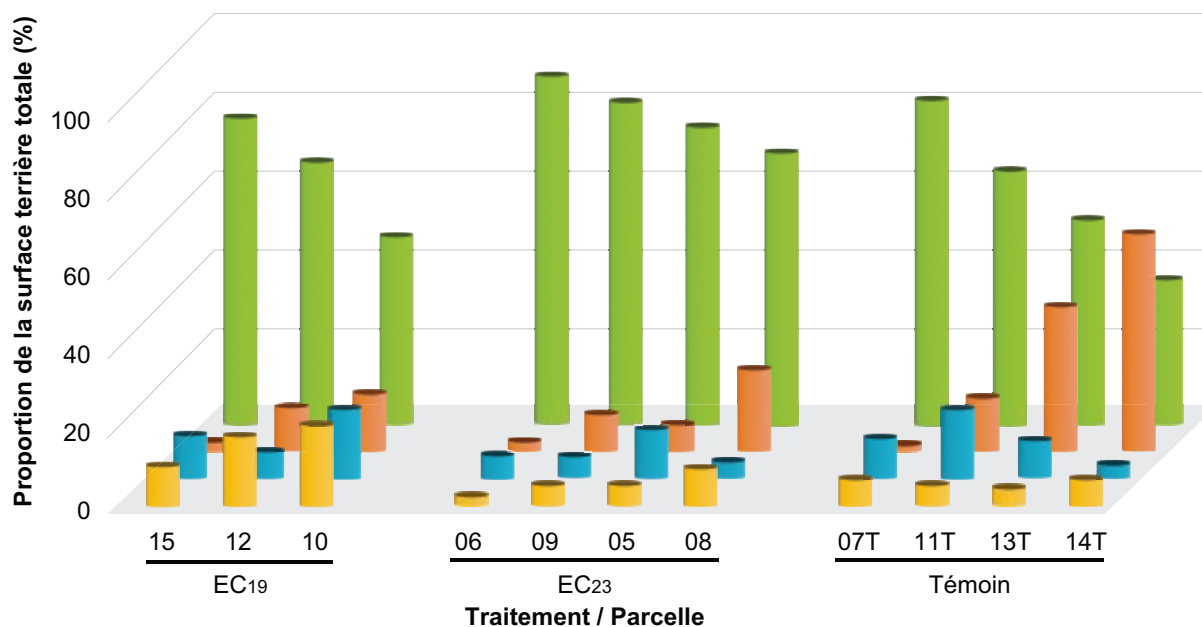


Figure 2. Proportion en surface terrière du pin blanc, des peupliers, des autres résineux et des autres feuillus dans chacune des parcelles après la coupe. Autres feuillus = bouleau à papier, bouleau jaune, chêne rouge, érable à sucre, érable rouge, frêne noir, hêtre à grandes feuilles, ostryer de Virginie, tilleul d'Amérique; autres résineux = épinette blanche, pin gris, pin rouge, sapin baumier; peupliers = le peuplier à grandes dents et dans une moindre mesure, le peuplier faux-tremble (13 % des peupliers pour l'ensemble des parcelles).

à leur distribution diamétrale. Afin de tenir compte de l'influence de ces proportions, une méthode de calcul a été élaborée pour calculer la production par classe de DHP selon la qualité de sciage (voir la section 1.4.2). Cette méthode, présentée à l'annexe 2, est basée sur les relations linéaires unissant la surface terrière après la coupe des parcelles avec la production interne, le recrutement et le transfert de classe de DHP.

1.5 Analyses statistiques

Comme les parcelles appartenant à chacun des niveaux d'éclaircie ont été regroupées *a posteriori* à partir des similarités de leur surface terrière après la coupe, il n'y a pas eu de répartition aléatoire des traitements, au sens statistique du terme. Des analyses statistiques ont quand même été effectuées, comme si ce postulat avait été respecté. Il faut donc rester prudent dans l'interprétation des résultats.

Les traitements (regroupements de surface terrière après la coupe) et le DHP initial ont été considérés comme des facteurs à effets fixes, tandis que les parcelles ont été considérées comme des facteurs à effets aléatoires. La surface terrière avant la coupe n'a pas été considérée comme variable, étant donné qu'elle était linéairement reliée au DHP initial. Les interactions entre le DHP initial (variable continue) et les traitements ont été considérées dans les analyses (modèle à pentes non parallèles).

Les 3 traitements ont été pris en compte dans les modèles par l'emploi de 2 variables indicatrices binaires ($Z1$ et $Z2$) de la manière suivante :

$Z1_i = 1$ et $Z2_i = 0$ si le traitement i de la parcelle j est l'EC19;

$Z1_i = 0$ et $Z2_i = 1$ si le traitement i de la parcelle j est l'EC23;

$Z1_i = 0$ et $Z2_i = 0$ si le traitement i de la parcelle j est le Témoin.

Les analyses statistiques ont été effectuées avec la procédure GLIMMIX du progiciel SAS (v. 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, États-Unis). L'hypothèse de normalité a été vérifiée à l'aide de la statistique de Shapiro-Wilks et de graphiques, tandis que l'homogénéité de la variance a été vérifiée graphiquement. Une transformation logarithmique a été effectuée au besoin afin de normaliser les résidus et de stabiliser leur variance. Comme cette transformation biaise un peu les estimations des moyennes lors du retour à l'échelle originale, le biais a été corrigé en ramenant la moyenne à l'échelle originale à l'aide d'une transformation inverse $[\exp(\bar{y} + \sigma^2/2)]$ (Calama et Montero 2005). Les tests sur les composantes de la

variance ont été faits avec une probabilité d'erreur de type 1 de 30 % (seuil théorique $\alpha = 0,30$). Le seuil de signification statistique a été fixé à $\alpha = 0,05$ pour toutes les analyses et tous les autres tests. Lorsqu'un effet fixe était significatif, des comparaisons multiples des moyennes ont été effectuées et les seuils ont été ajustés avec l'approche par simulation pour détecter les différences significatives entre les moyennes (Westfall *et al.* 2000). Lorsque les ajustements des différents traitements n'étaient pas parallèles, les comparaisons multiples ont été testées pour 6 valeurs de DHP couvrant l'étendue des valeurs, soit celles de la moyenne, du 10^e percentile, du 1^{er} quartile, de la médiane, du 3^e quartile et du 90^e percentile de l'ensemble des données. Les seuils de comparaisons multiples ont été ajustés (Westfall *et al.* 2000) pour chaque valeur de DHP initial considérée.

1.5.1 Accroissement en diamètre et en surface terrière des pins blancs

Le modèle utilisé est un modèle polynomial de degré 2, avec ordonnées à l'origine aléatoires et pentes aléatoires. Un facteur de pondération $1/DHP^0$ a été appliqué lors de la modélisation pour satisfaire les hypothèses sous-jacentes au modèle :

$$AccDHP \text{ ou } ACCST_{ijk} = a + d Z1_i + e Z2_i + b DHP_{ijk} + c DHP_{ijk}^2 + ub_i + \varepsilon_{ijk}$$

où $AccDHP$ = accroissement du DHP en 25 ans,

$AccST$ = accroissement en surface terrière en 25 ans,

DHP = diamètre initial,

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ub = effet aléatoire des parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

1.5.2 Taux de production par accroissement des pins blancs survivants

Le taux de production par accroissement a été calculé en divisant l'accroissement en surface terrière d'un arbre survivant après 25 ans par la surface terrière initiale de cet arbre. Le modèle utilisé est un modèle polynomial de degré 2 avec ordonnées à l'origine aléatoires, qui a été appliqué sur

le logarithme du taux d'accroissement pour satisfaire les hypothèses sous-jacentes au modèle. Le modèle utilisé est :

$$\text{LogTauxAccSt}_{ijk} = a + f Z1_i + g Z2_i + b \text{DHP}_{ijk} + c \text{DHP}_{ijk}^2 + d \text{DHP}_{ijk} Z1_i$$

où LogTauxAccSt = logarithme du taux de production par accroissement en surface terrière après 25 ans,

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua = effet aléatoire des parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

1.5.3. Taux de mortalité des pins blancs

Afin de modéliser le caractère binomial de la mortalité, un modèle linéaire mixte généralisé a été utilisé, en retenant la fonction de lien appropriée (Littell *et al.* 2002). Le modèle retenu est un modèle logit additif (absence d'interactions) avec ordonnées à l'origine, qui a été appliqué à partir de la transformation $\log [p/(1-p)]$ où p est le taux de mortalité.

La forme de modèle polynomiale a été la seule testée, étant donné sa simplicité et le fait qu'elle constitue une bonne approximation du modèle curvilinéaire que présentait un graphique des données. Le modèle retenu a été le polynôme de degré 2, car il présentait un meilleur ajustement que celui de degré 1. Toutefois, il faut rester prudent dans l'interprétation du taux de mortalité pour les gros diamètres, étant donné leur très petit nombre, ce qui augmente l'impact de la mort d'une seule tige sur leur taux de mortalité. Le modèle utilisé est :

$$\text{Log} \frac{\text{TauxMort}_{ijk}}{(1-\text{TauxMort}_{ijk})} = a + f Z1_i + g Z2_i + b \text{DHP}_{ijk} + c \text{DHP}_{ijk}^2 + ua_j + \varepsilon_{jk(i)}$$

où TauxMort = taux de mortalité en surface terrière après 25 ans,

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua = effet aléatoire des parcelles et

$\varepsilon_{jk(i)}$ = terme d'erreur.

1.5.4 Taux de production interne des pins blancs

Le taux de production interne des pins blancs a été calculé par classe de DHP initial de 4 cm en divisant la production interne après 25 ans par la surface terrière des pins blancs après la coupe. Le nombre de tiges par classe de DHP dans chacune des parcelles a été retenu comme facteur de pondération.

La forme polynomiale de degré 2 a été utilisée pour modéliser ce taux de production en fonction du DHP initial. Le modèle utilisé est :

$$\text{TauxProd}_{ijk} = d + h Z1_i + l Z2_i + c \text{DHP}_{ijk} + b \text{DHP}_{ijk}^2 + g \text{DHP}_{ijk} Z1_i + k \text{DHP}_{ijk} Z2_i + f \text{DHP}_{ijk}^2 Z1_i + j \text{DHP}_{ijk}^2 Z2_i + ua_i + \varepsilon_{ijk}$$

où TauxProd = taux de production interne en surface terrière après 25 ans,

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua = effet aléatoire des parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

1.5.5 Erreur type d'un quotient de moyennes

L'erreur type d'un quotient de moyennes, comme le rapport des moyennes des parcelles de 2 variables, a été estimée en utilisant la formule de Cochran (1977, p. 155) pour la variance d'un quotient, puis en calculant sa racine carrée. La formule utilisée a été la suivante :

$$\text{Soit } \frac{Y}{X} = Q$$

$$\text{Alors } \text{Var}(Q) = \left(\frac{1}{nX^2}\right) \text{Var}(Y) + Q^2 \text{Var}(X) - 2QCov(X,Y)$$

$$\text{et } \text{Err} = \sqrt{\text{Var}(Q)}$$

où Y = moyenne de la variable y ,

X = moyenne de la variable x ,

Q = quotient des moyennes de la variable y divisée
par la variable x ,

n = nombre d'observations,

Var = variance,

$Covar$ = covariance et

Err = erreur type.

Chapitre 2 – Résultats

2.1 Caractéristiques dendrométriques des parcelles

2.1.1 Composition en pin blanc des parcelles après la coupe

La proportion de la surface terrière en pin blanc était variable selon les parcelles (figure 2). Dans 8 d'entre elles, le pin blanc occupait de 64 % à 89 % de la surface terrière totale après la coupe. La parcelle 10, avec un peu moins de 50 % de pin blanc, présentait une forte proportion de feuillus autres que les peupliers. Pour leur part, les parcelles témoins 13T et 14T présentaient une forte proportion de peupliers (respectivement de 37 % et 55 %), avec 52 % et 37 % de pin blanc.

2.1.2 Nombre de tiges après 25 ans

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

Vingt-cinq ans après la coupe, le nombre de tiges de dimension marchande a peu changé pour l'EC19 (547 tiges·ha⁻¹), mais il a augmenté de 15 % pour atteindre 544 tiges·ha⁻¹ pour l'EC23 et a diminué de 12 % pour atteindre 593 tiges·ha⁻¹ pour le Témoin (tableau 2).

Pour l'ensemble des parcelles, la proportion de feuillus a augmenté au détriment de celle des résineux, passant d'un rapport 1:2 après la coupe à près de 1:1 après 25 ans (figure 3a), les recrues chez les feuillus ayant été plus nombreuses que chez les résineux (figure 3c).

Parmi les résineux, seul le sapin baumier a augmenté après 25 ans (figure 3b), en raison d'un recrutement beaucoup plus important que chez les autres espèces du groupe (figure 3c). L'épinette blanche et le pin blanc n'ont présenté en moyenne que quelques recrues à l'hectare, et aucune recrue n'a été observée chez le pin gris et le pin rouge. Le taux de mortalité des résineux a été généralement plus élevé pour le Témoin que pour les éclaircies (tableau 3) et particulièrement important chez le sapin baumier (de 66 % à 80 %) et l'épinette blanche (de 39 % à 59 %), essences pour lesquelles il allait en augmentant avec la grosseur des tiges (données non présentées). Chez les pins blancs et les pins rouges, le taux de mortalité a augmenté avec la surface terrière après la coupe (valeurs respectives de 14 %, 26 % et 35 % pour les traitements EC19, EC23 et Témoin pour le pin blanc, et de 7 %, 21 % et 31 % pour le pin rouge; tableau 3). Le taux de mortalité des pins blancs ayant un DHP de 30 à 45 cm a été réduit par l'éclaircie, passant de 12 % (Témoin) à 3 % (EC19 et EC23; données non présentées).

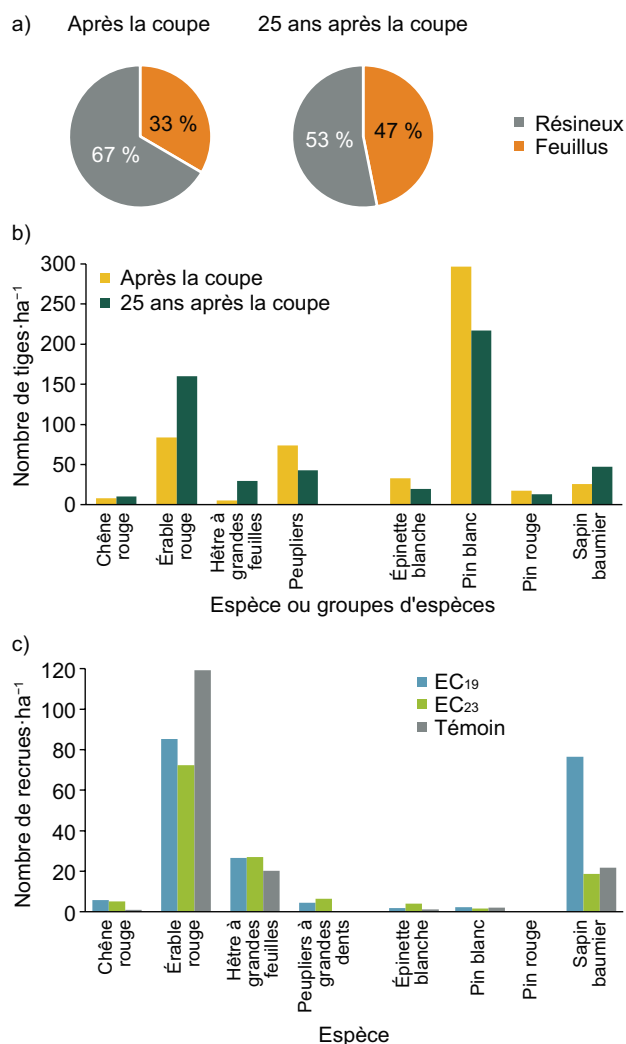


Figure 3. Évolution dans le temps du nombre de tiges de dimension marchande (DHP ≥ 9 cm) : a) proportion en résineux et en feuillus pour l'ensemble des parcelles; b) nombre de tiges par espèce ou groupe d'espèces pour l'ensemble des parcelles; c) nombre de recrues après 25 ans par traitement.

Parmi les feuillus, l'érable rouge et les peupliers étaient les plus nombreux après la coupe; 25 ans plus tard, le nombre d'érables rouges a augmenté, alors que celui des peupliers a diminué (figure 3b), en raison d'un fort recrutement chez l'érable rouge (figure 3c) et d'un taux de mortalité élevé chez les peupliers (tableau 3). Le taux de mortalité du bouleau à papier a été plus élevé pour les traitements d'éclaircie (75 % pour l'EC19 et 61 % pour l'EC23 contre 49 % pour le Témoin). Le hêtre à grandes feuilles, présent en petit nombre dans chacune des parcelles et presque exclusivement restreint

Tableau 2. Variables dendrométriques mesurées dans chaque traitement avant, immédiatement après, 10 ans après et 25 ans après la coupe d'éclaircie, pour les arbres de dimensions marchandes (DHP $\geq 9,1$ cm) de toutes les espèces et pour le pin blanc. Les valeurs entre parenthèses indiquent l'erreur type de la moyenne.

Espèce	Variable	Moment de la mesure						Différence					
		Traitement		Après la coupe		10 ans après la coupe		25 ans après la coupe		25 ans – après la coupe			
Toutes les espèces	Nombre de tiges·ha ⁻¹	EC19	829 (25)	536 (23)	529 (28)	547 (18)	-282	-34 %	11	2 %	293	(20)	
		EC23	692 (26)	472 (22)	462 (27)	544 (14)	-148	-21 %	73	15 %	220	(11)	
		Témoin	676 (53)	—	652 (46)	593 (36)	-83	-12 %	—	—	—	—	
	DHP moyen quadratique (cm)	EC19	23,1 (0,7)	21,3 (0,4)	24,1 (0,4)	26,8 (0,3)	3,7	16 %	5,5	26 %	25,8	(1,3)	
		EC23	25,7 (0,3)	25,0 (0,4)	27,5 (0,6)	27,7 (0,4)	2,0	8 %	2,7	11 %	27,2	(0,4)	
		Témoin	26,7 (0,8)	—	28,3 (0,9)	29,4 (1,2)	2,7	10 %	—	—	—	—	
	Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	EC19	34,7 (2,2)	19,1 (0,3)	24,0 (0,5)	30,8 (0,4)	-3,9	-11 %	11,7	61 %	15,6	(2,5)	
		EC23	35,8 (0,8)	23,1 (0,4)	27,2 (0,5)	32,7 (0,7)	-3,1	-9 %	9,6	42 %	12,8	(0,4)	
		Témoin	37,4 (0,8)	—	40,4 (0,5)	39,8 (0,8)	2,3	6 %	—	—	—	—	
	Pin blanc	Nombre de tiges·ha ⁻¹	EC19	292 (93)	220 (75)	206 (68)	187 (58)	-104	-36 %	-32	-15 %	72	(18)
			EC23	389 (14)	303 (11)	277 (11)	227 (12)	-161	-42 %	-76	-25 %	86	(4)
			Témoin	348 (17)	—	319 (18)	229 (18)	-120	-35 %	—	—	—	—
DHP moyen quadratique (cm)		EC19	28,1 (3,4)	28,7 (3,7)	33,5 (4,2)	39,5 (4,5)	11,3	40 %	10,8	38 %	26,9	(2,6)	
		EC23	27,7 (0,4)	27,7 (0,6)	31,8 (0,9)	37,7 (1,3)	10,1	36 %	10,1	36 %	27,8	(1,2)	
		Témoin	28,2 (2,6)	—	31,4 (3,1)	37,8 (4,0)	9,5	34 %	—	—	—	—	
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)		EC19	15,9 (1,6)	12,2 (1,5)	15,8 (1,8)	20,3 (2,5)	4,3	27 %	8,1	67 %	3,8	(0,2)	
		EC23	23,4 (0,7)	18,2 (0,9)	21,9 (1,2)	25,3 (1,3)	2,0	8 %	7,1	39 %	5,1	(0,2)	
		Témoin	21,8 (3,1)	—	24,6 (3,6)	25,4 (3,8)	3,6	16 %	—	—	—	—	
Volume marchand brut (m ³ ·ha ⁻¹)		EC19	183 (12)	139 (12)	189 (17)	236 (24)	54	29 %	97	70 %	43	(1)	
		EC23	273 (9)	213 (12)	266 (15)	319 (18)	46	17 %	106	50 %	60	(3)	
		Témoin	256 (43)	—	297 (51)	319 (55)	63	25 %	—	—	—	—	

à la classe de DHP de 9-14 cm après la coupe, a augmenté autant dans les parcelles éclaircies que témoins, passant en moyenne de 5 à 29 tiges·ha⁻¹ en 25 ans (figure 3b). Cette augmentation est entièrement due au recrutement, puisqu'aucune mortalité n'a été observée (tableau 3).

Vingt-cinq ans après la coupe, le couvert dominant, composé des 100 plus grosses tiges à l'hectare, s'est généralement enrichi en pin blanc dans chacune des parcelles, au détriment des autres espèces, en particulier les peupliers et l'épinette blanche (tableau 4).

2.1.2.2 Gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm)

Vingt-cinq ans après la coupe, le nombre de gaules d'espèces commerciales était 1,8 fois plus élevé pour l'EC19 (4550 gaules·ha⁻¹) et l'EC23 (4480 gaules·ha⁻¹) que pour le Témoin (2540 gaules·ha⁻¹) (figure 4). L'érable rouge a été l'espèce la plus favorisée par les éclaircies, passant de quelques centaines à plus de 1600 gaules·ha⁻¹ après 25 ans, pendant que pour le Témoin, ce nombre a diminué. Les gaules de sapin baumier et de hêtre à grandes feuilles ont augmenté avec le temps, alors que celles des peupliers et de pin blanc ont diminué, peu importe le traitement (figure 4). Après 25 ans, la moitié des parcelles ne contenaient plus aucune gaule de pin blanc, et l'autre moitié n'en comptait que quelques-unes. Les gaules de peupliers ont toujours été absentes ou presque des parcelles témoins, même dans les parcelles 13T et 14T qui comptaient pourtant de fortes proportions de peupliers (figure 2).

Après 25 ans, le nombre de gaules d'espèces non commerciales était beaucoup plus faible que celui des espèces commerciales, soit de 900, 600 et 350 gaules·ha⁻¹ respectivement pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin (données non présentées). L'érable à épis et le noisetier, les espèces les plus abondantes, représentaient respectivement 48 %, 58 % et 84 % des gaules d'espèces non commerciales de l'EC19, l'EC23 et du Témoin.

2.1.3 Diamètre moyen quadratique après 25 ans

Vingt-cinq ans après la coupe, le diamètre moyen quadratique (DHPq), pour l'ensemble des espèces, variait de 27 à 29 cm selon les traitements (tableau 2). La plus importante augmentation moyenne du DHPq a été de 5,5 cm (+26 %) pour l'EC19, comparativement à 2,7 cm pour l'EC23 et le Témoin (+11 % et +10 %, respectivement).

Vingt-cinq ans après la coupe, les valeurs de DHPq étaient plus grandes pour le pin blanc que pour l'ensemble des espèces (de 38 à 39 cm selon les traitements; tableau 2). Le DHPq a aussi augmenté davantage pendant cette période pour le pin blanc (en moyenne, de 10,8 cm pour l'EC19, de 10,1 cm pour l'EC23 et de 9,5 cm pour le Témoin) que pour l'ensemble des espèces.

Le DHPq des pins blancs du couvert dominant variait de 48 à 51 cm selon les traitements, 25 ans après la coupe, et son augmentation a été inversement proportionnelle à la surface terrière après la coupe des traitements (respectivement de 11,5 cm, 8,9 cm et 7,0 cm pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin; données non présentées).

Tableau 3. Nombre de tiges vivantes ayant un DHP $\geq 9,1$ cm après la coupe d'éclaircie et taux de mortalité après 25 ans, par espèce et par traitement.

Groupe d'espèces	Espèce	EC19		EC23		Témoin	
		Tiges vivantes après la coupe	Taux de mortalité après 25 ans	Tiges vivantes après la coupe	Taux de mortalité après 25 ans	Tiges vivantes après la coupe	Taux de mortalité après 25 ans
Résineux	Sapin baumier	84	79 %	86	66 %	104	80 %
	Épinette blanche	96	41 %	120	39 %	123	59 %
	Pin blanc	482	14 %	1213	26 %	1210	35 %
	Pin rouge	27	7 %	29	21 %	100	31 %
Feuillus	Bouleau à papier	4	75 %	44	61 %	37	49 %
	Peuplier faux-tremble	86	58 %	23	48 %	47	60 %
	Peuplier à grandes dents	108	44 %	135	41 %	288	46 %
	Érable rouge	310	22 %	170	17 %	329	19 %
	Chêne rouge	39	13 %	28	14 %	17	41 %
	Hêtre à grandes feuilles	8	0 %	23	0 %	22	0 %

Tableau 4. Nombre de tiges par parcelle des espèces du couvert dominant (100 plus grosses tiges à l'hectare) 25 ans après la coupe d'éclaircie, et différence entre ces valeurs et celles après la coupe. PIB = pin blanc; PE = peuplier à grandes dents et peuplier faux-tremble; EPB = épinette blanche; PIR = pin rouge; Autres = bouleau à papier, chêne rouge, érable rouge, érable à sucre, sapin baumier et tilleul d'Amérique.

Traitement	Parcelle	25 ans après la coupe					Différence (25 ans – après la coupe)				
		PIB	PE	EPB	PIR	Autres	PIB	PE	EPB	PIR	Autres
EC19	10	64	11	6	4	15	-1	5	-5	0	1
	12	94	4	0	1	1	12	-7	-1	0	-4
	15	88	0		12		0	-2		2	
EC23	05	92	4	1	3		4	0	-6	2	
	06	100	0	0			4	-2	-2		
	08	79	16	0	4	1	14	-12	-1	0	-1
	09	96	4	0			6	-5	-1		
Témoin	07T	99		0	1		2		-2	0	
	11T	84	9	1	6		10	-5	-3	-2	
	13T	59	35	1	4	1	16	-17	0	0	1
	14T	34	66				16	-16			

2.1.4 Surface terrière après 25 ans

Vingt-cinq ans après la coupe, la surface terrière a atteint en moyenne 30,8 m²·ha⁻¹, 32,7 m²·ha⁻¹ et 39,8 m²·ha⁻¹ pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin (tableau 2). Elle a atteint un maximum de 41,1 m²·ha⁻¹ dans la parcelle témoin 11T. La surface terrière pour l'ensemble des espèces était plus petite que celle avant la coupe pour les 2 traitements d'éclaircie, avec un déficit à combler de 3 à 4 m²·ha⁻¹. La proportion de la surface terrière occupée par les résineux par rapport aux feuillus a peu évolué en 25 ans pour l'ensemble des parcelles, les résineux représentant globalement un peu plus de 80 % de la surface terrière.

Contrairement à celle pour l'ensemble des espèces, la surface terrière en pin blanc de chacune des parcelles éclaircies était plus grande 25 ans après la coupe que celle avant la coupe, avec des dépassements moyens de 4,3 m²·ha⁻¹ (EC19) et de 2,0 m²·ha⁻¹ (EC23) (tableau 2). Pour l'ensemble des traitements, la plus grande proportion de la surface terrière en pin blanc se trouvait dans la classe de DHP ≥ 42 cm, soit celle correspondant aux dimensions de la plus haute classe de qualité de sciage (G). Dans l'ensemble, cette proportion a doublé pour passer de 31 à 62 % en 25 ans (figure 5). La contribution du recrutement représente en moyenne 80 ± 8 % (EC19), 72 ± 7 % (EC23) et 65 ± 1 % (Témoin) de cette augmentation (données non présentées). La proportion de la surface terrière occupée par les pins blancs ayant les dimensions

des 2 plus hautes classes de qualité de sciage (G et H; DHP ≥ 27 cm) est passée de 69 % à 89 % après 25 ans.

2.1.5 Volume marchand brut du pin blanc après 25 ans

En moyenne, 25 ans après la coupe, le VMB en pin blanc atteignait presque 240 m³·ha⁻¹ pour l'EC19 et 320 m³·ha⁻¹ pour l'EC23 et le Témoin (tableau 2). Comme pour la surface terrière, le VMB en pin blanc de chacune des parcelles éclaircies a dépassé celle avant la coupe, en moyenne de 54 m³·ha⁻¹ (EC19) et de 46 m³·ha⁻¹ (EC23). Un VMB maximal en pin blanc de près de 450 m³·ha⁻¹ a été observé pour la parcelle témoin 07T, qui présentait la proportion en pin blanc la plus forte parmi les parcelles témoins (83 % de la surface terrière initiale; figure 2).

2.2 Croissance en diamètre du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe

L'accroissement en diamètre du pin blanc a augmenté significativement en fonction du DHP initial (figure 6a) jusqu'à un DHP de 67 cm (annexe 1.2, tableau A1.2.3), et il a été significativement différent entre les traitements ($p < 0,0001$; annexe 1.2, tableau A1.2.2). Par exemple, pour un pin blanc ayant un DHP de 20 cm après la coupe, la moyenne de l'accroissement en diamètre pour la période de 25 ans suivant la coupe a été respectivement de 7,0 cm pour l'EC19, de 4,6 cm pour l'EC23 et de 2,6 cm pour le Témoin; par contraste, pour un pin blanc ayant un DHP de 40 cm, les accroissements ont été respectivement de 12,5 cm, de 10,1 cm

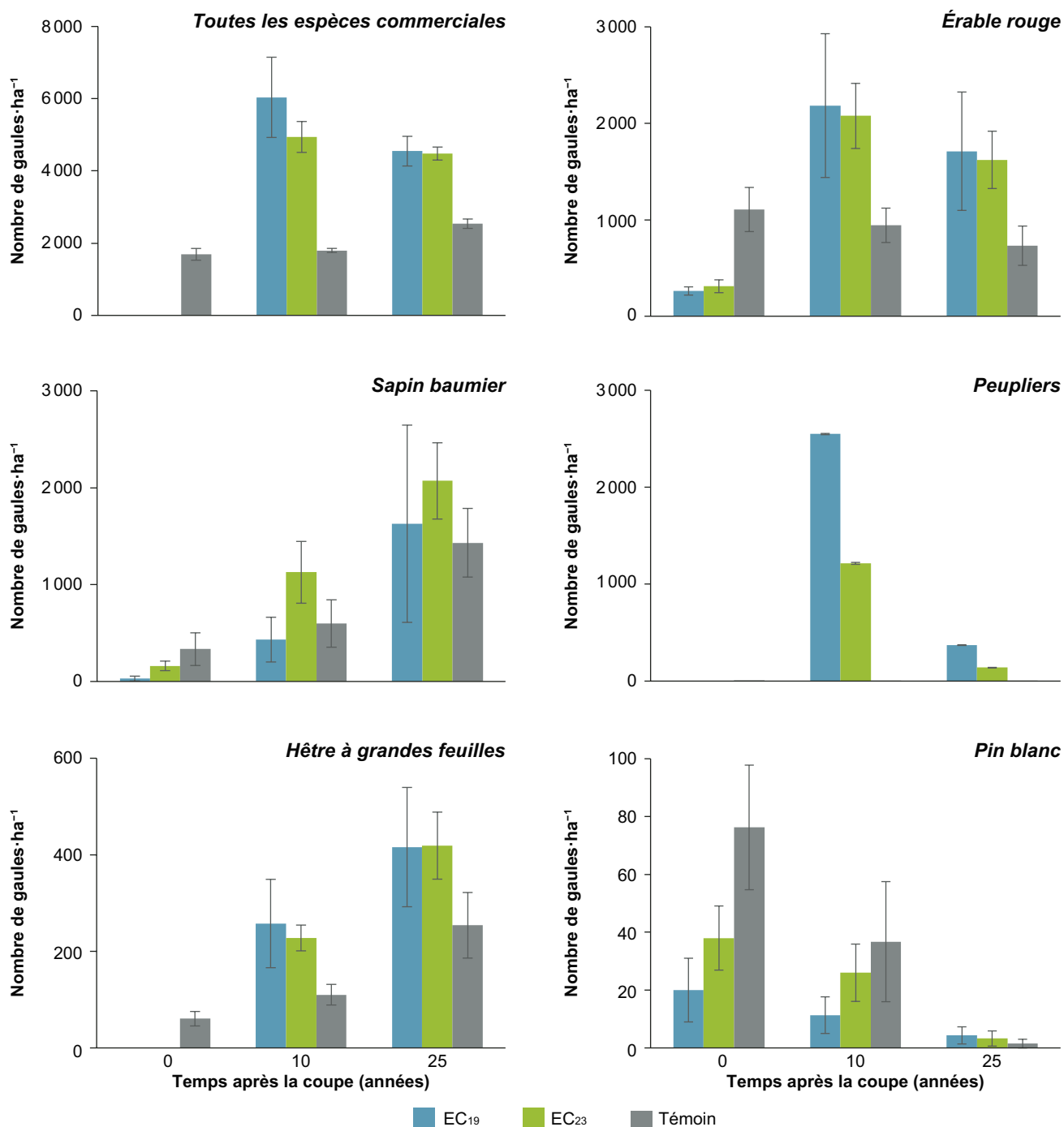


Figure 4. Évolution dans le temps du nombre de gaules (DHP de 1,1 à 9,0 cm), par espèce ou groupe d'espèces commerciales et par traitement. Les barres verticales indiquent l'erreur type de la moyenne.

et de 8,1 cm (figure 6a). Des valeurs individuelles d'accroissement de plus de 20 cm ont été observées pour des pins blancs avec un DHP initial de 27 à 57 cm (figure 6a). Comme la forme de la courbe moyenne de chacun des traitements n'était pas statistiquement différente entre les traitements, les différences d'accroissement entre ceux-ci étaient constantes, peu importe le DHP. Ainsi, l'écart moyen était de 2,34 cm entre l'EC19 et l'EC23, et de 2,03 cm entre l'EC23 et le Témoin.

Vingt-cinq ans après la coupe, la surface terrière des pins blancs individuels a augmenté, elle aussi, en fonction du DHP initial des pins, et elle a été significativement différente entre les traitements ($p < 0,0001$; annexe 1.3, tableau A1.3.2). Cependant, la forme de la relation est concave plutôt que convexe (figure 6b), ce qui signifie que le taux d'accroissement en surface terrière n'a pas ralenti jusqu'à des DHP de 70 cm, contrairement à la croissance en diamètre.

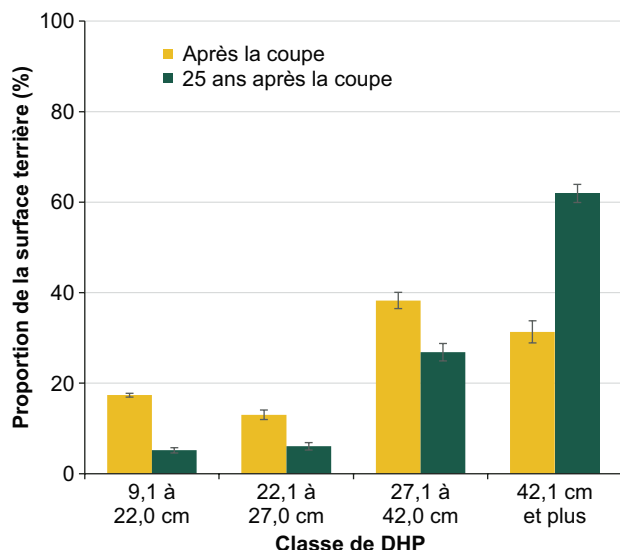


Figure 5. Répartition de la surface terrière en pin blanc après la coupe et 25 ans après la coupe, par classe de DHP, pour l'ensemble des traitements. Les barres indiquent l'erreur type de la moyenne.

2.3 Production pour la période de 25 ans suivant la coupe

Comme cela a été mentionné à la section 1.4.3.2, les parcelles témoins ont été regroupées afin de distinguer celles qui présentaient des proportions en peupliers beaucoup plus élevées que l'ensemble des autres parcelles du dispositif expérimental (Témoin PE+), d'une part, de celles qui présentaient des proportions similaires (Témoin PE-), d'autre part.

2.3.1 Toutes les espèces (tiges de dimension marchande)

Pour la période de 25 ans suivant la coupe, la production nette, toutes espèces confondues, a été inversement proportionnelle à la surface terrière après la coupe (figure 7a). Elle a été en moyenne de $11,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($0,47 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) pour l'EC19 et de $9,6 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($0,38 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) pour l'EC23 (tableau 5). Pour le Témoin, la production nette des parcelles a été inversement proportionnelle à la proportion de leur surface terrière initiale en peupliers ($R^2 = 0,99$, $n = 4$), soit en moyenne de $4,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les parcelles pauvres en peupliers (Témoin PE-) et de $-0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les parcelles riches en peupliers (Témoin PE+).

Pour toutes les espèces, le recrutement a été faible et assez semblable pour tous les traitements (figure 7d), de sorte que ce sont surtout les composantes de la production par accroissement des survivants et de la mortalité qui ont engendré les différences de production nette entre les traitements. La production par accroissement des survivants a

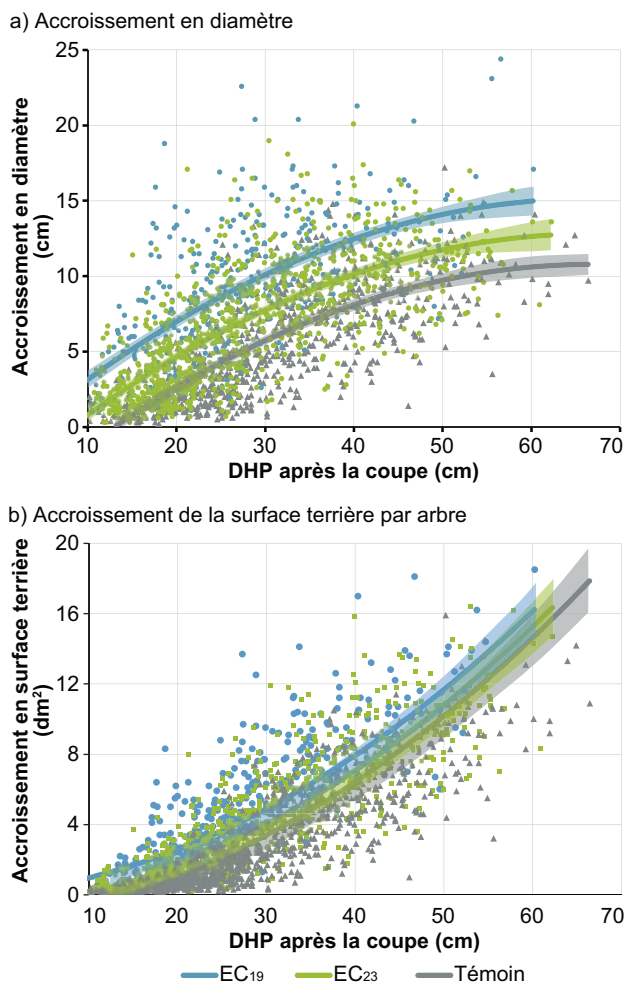


Figure 6. Accroissement du pin blanc par traitement 25 ans après la coupe en fonction du DHP après la coupe : a) accroissement du DHP; b) accroissement de la surface terrière par arbre. Les courbes représentent l'estimation de la moyenne des accroissements pour chacun des traitements selon une fonction polynomiale de degré 2, et les bandes translucides indiquent l'intervalle de confiance à 95 %.

été plus grande pour l'EC19 que pour les autres traitements (figure 7b). Quant à la mortalité, elle a été proportionnelle à la surface terrière après la coupe (figure 7c). La mortalité observée pour le Témoin ($12,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour le Témoin PE+ et $8,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour le Témoin PE-, soit des taux de 32 % et 23 %) a été près de 3 à 4 fois plus forte que pour les traitements d'éclaircie ($3,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'EC19 et $3,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'EC23, soit des taux de 16 % et 17 %; tableau 5).

La production périodique annuelle nette pour toutes les espèces a légèrement diminué au cours de la période de 11-25 ans comparativement à celle de 1-10 ans suivant la coupe pour l'EC19 et l'EC23; en revanche, pour le Témoin, cette diminution a été majeure, et la production a même été négative

Tableau 5. Bilan de production par traitement 25 ans après la coupe d'éclaircie, pour l'ensemble les espèces de DHP $\geq 9,1$ cm, les pins blancs de DHP $\geq 9,1$ cm et les pins blancs de DHP $\geq 22,1$ cm. Les valeurs entre parenthèses indiquent l'erreur type de la moyenne.

Espèces	Traitement*	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 la coupe	Après la coupe	25 ans	ACC SURV	MORT	PROD interne	REC				PROD nette
Toutes les espèces (DHP $\geq 9,1$ cm)	EC19	34,7 (2,2)	19,1 (0,3)	30,8 (0,4)	13,0 (0,1)	3,1 (0,6)	9,9 (0,5)	1,8 (0,3)	11,7 (0,3)	0,47 (0,01)	16 % (3 %)	15 % (3 %)
	EC23	35,8 (0,8)	23,1 (0,4)	32,7 (0,7)	11,0 (0,3)	3,8 (0,2)	7,2 (0,4)	2,4 (0,1)	9,6 (0,4)	0,38 (0,01)	17 % (1 %)	25 % (2 %)
	Témoins PE-	36,3 (1,2)	—	41,0 (0,1)	11,4 (0,2)	8,3 (0,8)	3,0 (1,0)	1,7 (0,1)	4,8 (1,1)	0,19 (0,05)	23 % (1 %)	37 % (6 %)
	Témoins PE+	38,6 (0,01)	—	38,5 (0,9)	10,4 (0,4)	12,2 (0,01)	-1,8 (0,4)	1,7 (0,5)	-0,1 (0,9)	-0,01 (0,04)	32 % (0,02 %)	—
Pin blanc (DHP $\geq 9,1$ cm)	EC19	15,9 (1,6)	12,2 (1,5)	20,3 (2,5)	8,8 (1,3)	0,7 (0,2)	8,1 (1,1)	0,01 (0,002)	8,1 (1,1)	0,32 (0,04)	6 % (0,9 %)	0,2 % (0,02 %)
	EC23	23,4 (0,7)	18,2 (0,9)	25,3 (1,3)	9,0 (0,5)	1,9 (0,1)	7,1 (0,4)	0,02 (0,002)	7,1 (0,4)	0,28 (0,02)	10 % (0,4 %)	0,3 % (0,04 %)
	Témoins PE-	26,5 (2,6)	—	31,0 (3,3)	8,9 (1,0)	4,3 (0,3)	4,6 (0,7)	0	4,6 (0,7)	0,18 (0,03)	16 % (0,6 %)	0 %
	Témoins PE+	17,2 (2,9)	—	19,7 (3,6)	5,8 (1,1)	3,3 (0,3)	2,5 (0,8)	0,03 (0,03)	2,5 (0,7)	0,10 (0,03)	19 % (1,3 %)	1,3 % (1,7 %)
Pin blanc (DHP $\geq 22,1$ cm)	EC19	13,1 (0,6)	9,9 (0,6)	19,3 (2,0)	7,4 (0,6)	0,3 (0,1)	7,1 (0,6)	2,3 (1,1)	9,4 (1,6)	0,38 (0,06)	3 % (0,4 %)	24 % (8 %)
	EC23	19,4 (0,7)	15,0 (1,0)	24,0 (1,4)	8,1 (0,6)	0,7 (0,1)	7,3 (0,6)	1,6 (0,3)	8,9 (0,6)	0,36 (0,02)	5 % (0,8 %)	18 % (3 %)
	Témoins PE-	24,2 (2,7)	—	30,7 (3,3)	8,8 (1,0)	2,5 (0,4)	6,3 (0,6)	0,2 (0,03)	6,5 (0,6)	0,26 (0,02)	10 % (0,6 %)	3 % (0,2 %)
	Témoins PE+	12,7 (3,1)	—	17,8 (4,2)	5,1 (1,2)	1,4 (0,3)	3,6 (0,9)	1,4 (0,2)	5,1 (1,1)	0,20 (0,05)	11 % (0,7 %)	28 % (3 %)

* Témoins PE- = parcelles 07T et 11T contenant 1 et 14 % de peupliers; Témoins PE+ = parcelles 13T et 14T contenant 37 et 55 % de peupliers (figure 2).

† ACC SURV = production par accroissement des arbres survivants; PROD interne = production interne (ACC SURV - MORT); REC = recrutement;

‡ MORT / surface terrière après la coupe.

§ REC / PROD nette.

Toutes les espèces

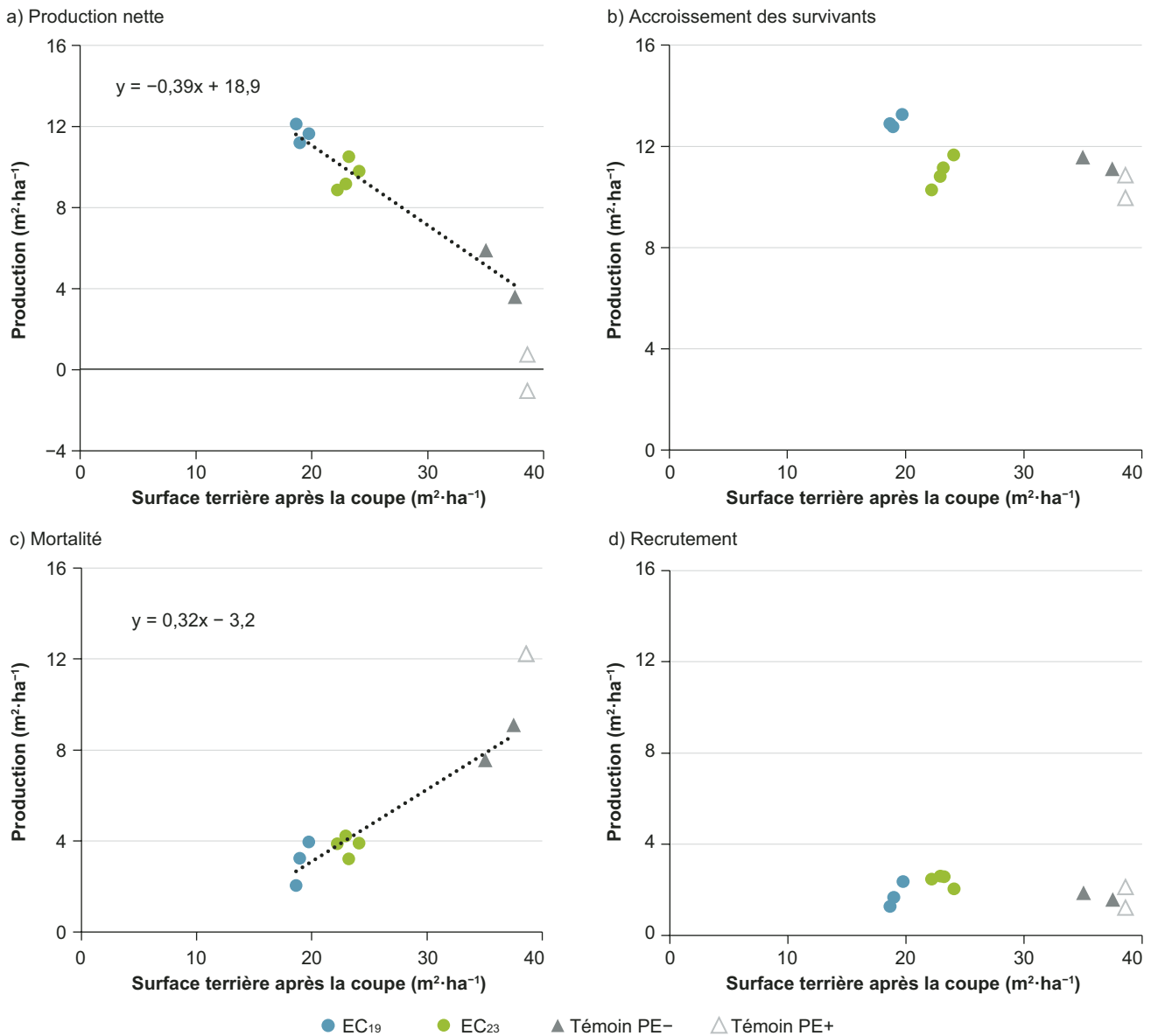


Figure 7. Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant la coupe, de l'ensemble des espèces de DHP $\geq 9,1$ cm en fonction de la surface terrière après la coupe : a) production nette; b) production par accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement.

dans cette période pour le Témoin PE+ (figure 8a). Dans la période de 11-25 ans, la production par accroissement des survivants a diminué pour tous les traitements (figure 8b), alors que la mortalité et le recrutement ont augmenté significativement pour l'EC23 et le Témoin, mais non pour l'EC19 (figures 8c et 8d).

2.3.2 Pin blanc

Les analyses de la production sont présentées pour les pins blancs de dimension marchande (DHP $\geq 9,1$ cm), de même que pour ceux de dimension suffisante pour générer des billes de sciage (DHP $\geq 22,1$ cm; voir la section 1.4.2).

Comme il a été mentionné à la section 1.4.3.2, les comparaisons entre les traitements pour le pin blanc se feront sur la base de la relation linéaire unissant la production à la proportion de la surface terrière en pin blanc après la coupe.

2.3.2.1 Pins blancs de dimension marchande (DHP $\geq 9,1$ cm)

Pour de mêmes proportions de surface terrière en pins blancs de dimension marchande après la coupe, la production nette pour la période de 25 ans suivant la coupe a été la plus grande pour l'EC19, suivie de l'EC23, et enfin du Témoin (figure 9a). Par exemple, avec une proportion de 70 % en pin blanc après la

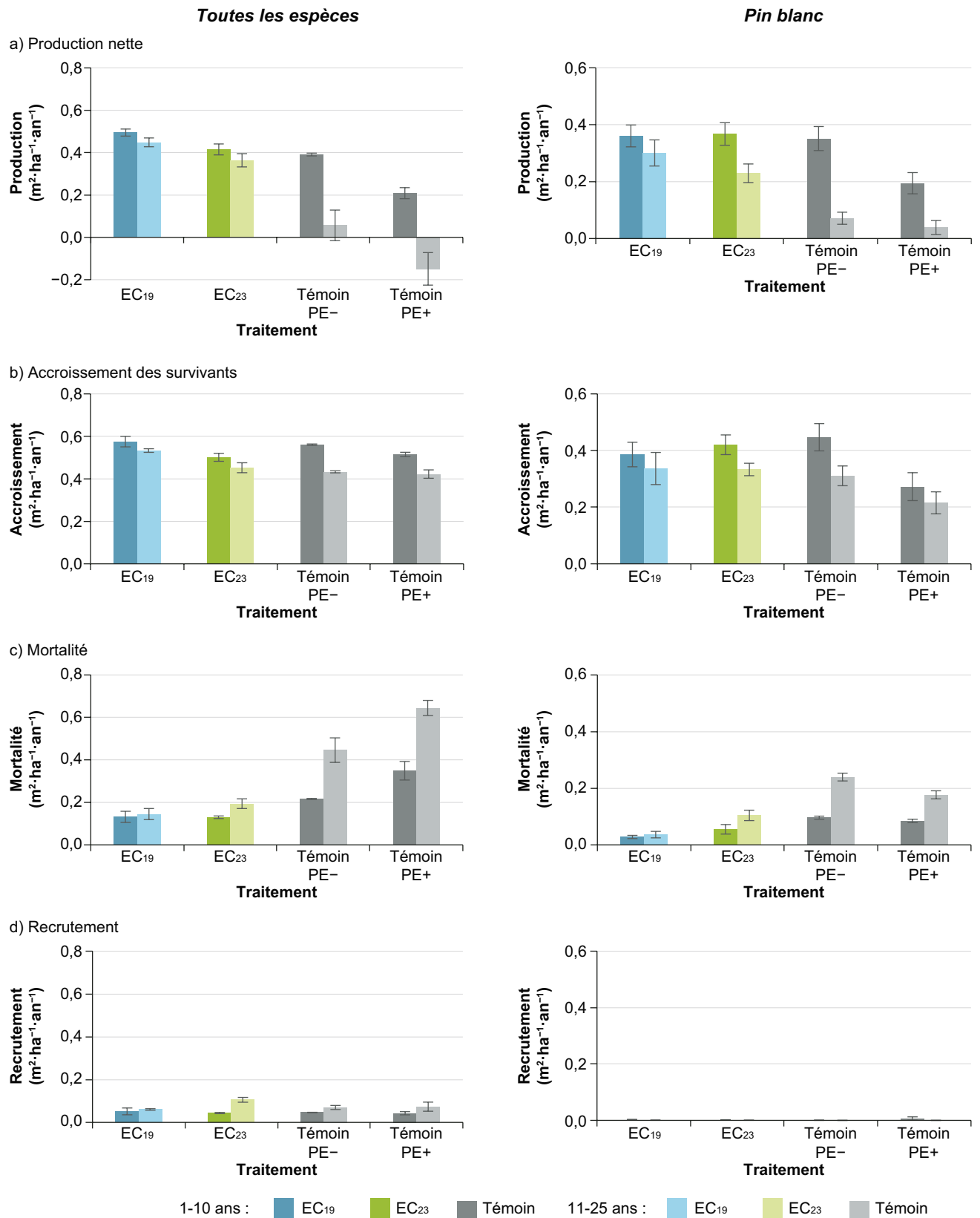


Figure 8. Production périodique annuelle par parcelle des arbres de dimensions marchandes (DHP $\geq 9,1$ cm) de toutes les espèces et de pin blanc, pour les périodes de 1-10 ans et de 11-25 ans après la coupe : a) production nette; b) production par accroissement des survivants; c) mortalité; d) recrutement.

coupe, la production nette estimée par les droites de régression était respectivement de $8,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $6,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $4,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ($0,35 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, $0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et $0,18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin PE-, ce qui représente un écart de $4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ entre l'EC19 et le Témoin PE-. Les différences de production nette ont résulté à la fois de la mortalité et de la production par accroissement des survivants, le recrutement ayant été pratiquement nul (tableau 5). La mortalité a été beaucoup plus forte pour le Témoin, et l'EC19 a montré une mortalité plus faible que l'EC23 (figure 9b). Le taux de mortalité a été de 6 %, 10 % et 16 % pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin PE-, respectivement (tableau 5). Pour une même proportion de pins après la coupe, la production par accroissement des survivants a été la plus grande pour l'EC19, suivie du Témoin, puis de l'EC23 (figure 9c). Comme la mortalité a été plus forte pour le Témoin que pour les 2 traitements d'éclaircie, ce classement de la production selon les traitements tient au fait qu'il y avait moins de pins survivants après 25 ans pour le Témoin. Lorsque cette production est comparée pour une même proportion de survivants, le Témoin et l'EC19 montrent une même production (figure 9d).

La production nette périodique annuelle du pin blanc a diminué au cours de la période de 11-25 ans après la coupe comparativement à celle de 1-10 ans, et ce, à un degré proportionnel à la surface terrière après la coupe (figure 8a). Durant la période de 11-25 ans, la production par accroissement des survivants a diminué pour chacun des traitements (figure 8b); la mortalité a augmenté significativement pour l'EC23 et le Témoin, mais pas pour l'EC19 (figure 8c).

2.3.2.2 Pins blancs de dimension sciage (DHP $\geq 22,1$ cm)

2.3.2.2.1 Production observée

La production nette en surface terrière des pins blancs de dimension sciage a été plus forte que celle des pins blancs de dimension marchande, même si la surface terrière après la coupe des premiers était plus faible (tableau 5). Cette production accrue des pins blancs de dimension sciage est attribuable à un recrutement plus important ainsi qu'à une mortalité plus faible, malgré une plus faible production par accroissement des survivants.

Pour de mêmes proportions en pins blancs de DHP $\geq 22,1$ cm, la production nette des traitements a été inversement proportionnelle à leur surface terrière après la coupe (figure 10a). Par exemple, pour une proportion de 60 % en pins blancs de dimension sciage après la coupe, la production nette estimée par les droites de régression était de

$10,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $8,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $5,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin PE-, ce qui correspond à un écart de $4,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ entre le l'EC19 et le Témoin. Les parcelles du Témoin PE+ ont montré une production nette proportionnellement plus grande que celles du Témoin PE-, en grande partie à cause d'un recrutement plus fort, lui-même attribuable à une plus grande abondance de pins blancs ayant un DHP de 9-22 cm après la coupe (figure 10f).

La mortalité des pins blancs de dimension sciage a été plus faible que celle des pins blancs de dimension marchande (tableau 5). Cet écart est non seulement dû à une plus petite surface terrière après la coupe, mais aussi à un taux de mortalité de 1,5 à 2 fois plus faible (tableau 5). Tout comme pour les pins blancs de dimension marchande, la mortalité des pins blancs de dimension sciage a été plus forte pour le Témoin que pour les traitements d'éclaircie (figure 10b).

La production par accroissement des survivants a peu varié entre les traitements (figure 10c). Par exemple, avec 60 % de la surface terrière en pins blancs de dimension sciage après la coupe, les productions estimées par les droites de régression étaient de $8,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $7,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $7,9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin PE-, respectivement.

La production interne (différence entre l'accroissement des survivants et la mortalité) a montré le même gradient dans les traitements que la production nette (figure 10d).

Alors que le recrutement en pins blancs de dimension marchande a été pratiquement nul, celui en pins blancs de dimension sciage a été significatif : sa contribution a représenté respectivement 24 % et 18 % de la production nette de l'EC19 et de l'EC23 (tableau 5). Pour de mêmes proportions en pins blancs ayant un DHP de 9-22 cm après la coupe, le recrutement a été plus important pour l'EC19 que pour les 2 autres traitements (figure 10f).

2.3.2.2.2 Production nette estimée

La variation de la distribution diamétrale des pins blancs selon les parcelles et celle des proportions par classe de DHP selon les traitements (annexe 2, tableau A2.2) ont engendré des différences de production nette entre les traitements après 25 ans. Afin de diminuer cette influence de la distribution diamétrale lors de la comparaison des traitements, la proportion de pins blancs a été fixée pour chacune des classes de DHP (9-22 cm, 22-27 cm, 27-42 cm et ≥ 42 cm) selon la moyenne de l'ensemble des parcelles, soit respectivement 15 %, 10 %, 40 % et 35 % de la surface terrière en pins blancs de DHP $\geq 9,1$ cm après la coupe (soit 85 % en pins

Pins blancs de DHP ≥ 9,1 cm

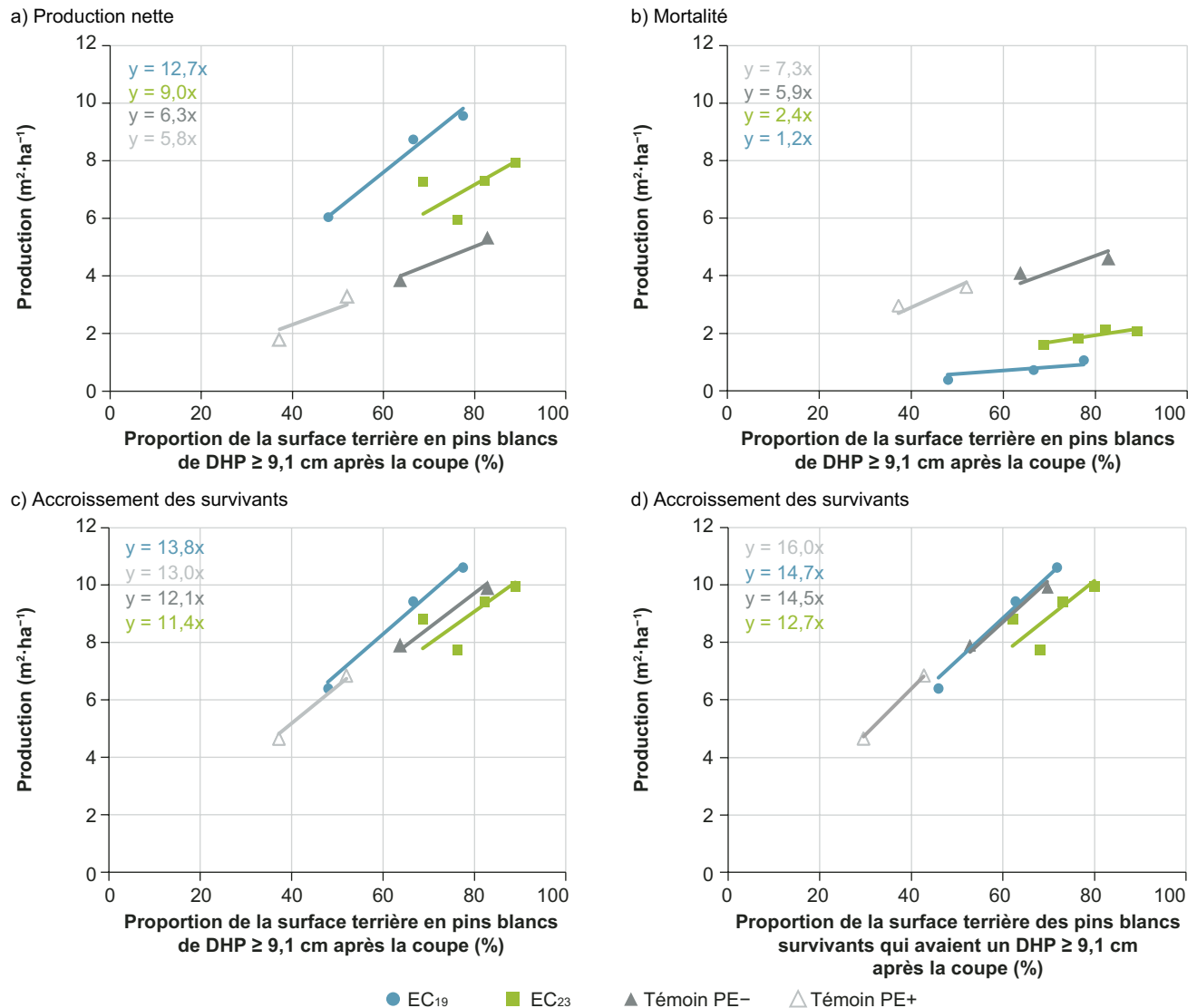


Figure 9. Production par parcelle, pour la période de 25 ans suivant la coupe, des pins blancs de DHP ≥ 9,1 cm en fonction de la proportion de surface terrière après la coupe : a) production nette; b) mortalité; c) production par accroissement des survivants; d) production par accroissement des survivants en fonction de la proportion de la surface terrière des pins blancs qui avaient un DHP ≥ 9,1 cm après la coupe et ayant survécu après 25 ans. Les droites de régression ont été forcées de passer par l'origine.

de dimension sciage), et la production nette des pins blancs de dimension sciage a été estimée avec ces proportions en utilisant la méthode présentée à l'annexe 2. Ces estimations montrent le même gradient entre les traitements que pour les productions moyennes observées, soit une augmentation du Témoin à l'EC19 (figure 11). Pour une proportion variant de 60 % à 90 % de la surface terrière après la coupe en pin blanc, la production nette en pins blancs de dimension sciage varierait de 8,5 à 12,7 m².ha⁻¹ (0,34 à 0,51 m².ha⁻¹.an⁻¹) pour l'EC19, de 6,3 à 9,5 m².ha⁻¹ (0,25 à 0,38 m².ha⁻¹.an⁻¹) pour l'EC23 et de 4,8 à 7,2 m².ha⁻¹ (0,19 à 0,29 m².ha⁻¹.an⁻¹) pour le Témoin. Ces estimations montrent qu'avec une proportion de la surface terrière après la coupe

en pin blanc de 80 %, le temps nécessaire pour produire 10 m².ha⁻¹ de pins blancs de dimension sciage serait de 22, 30 et 39 ans pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin, respectivement.

Lorsque la proportion de petit bois est augmentée de 20 % (+10 % pour chacune des classes de 9-22 cm et 22-27 cm, et -10 % pour chacune des classes de 27-42 cm et ≥ 42 cm), la production nette estimée varie peu pour l'EC19 (+4 %) et l'EC23 (-1 %), alors que pour le Témoin, elle diminue significativement (-19 %). La surface terrière des pins ayant un DHP de 27-42 cm après 25 ans augmente alors de 38 % (EC19) ou de 23 % (EC23), alors que celle des pins de DHP ≥ 42 cm diminue de 27 %.

Pins blancs de DHP ≥ 22,1 cm

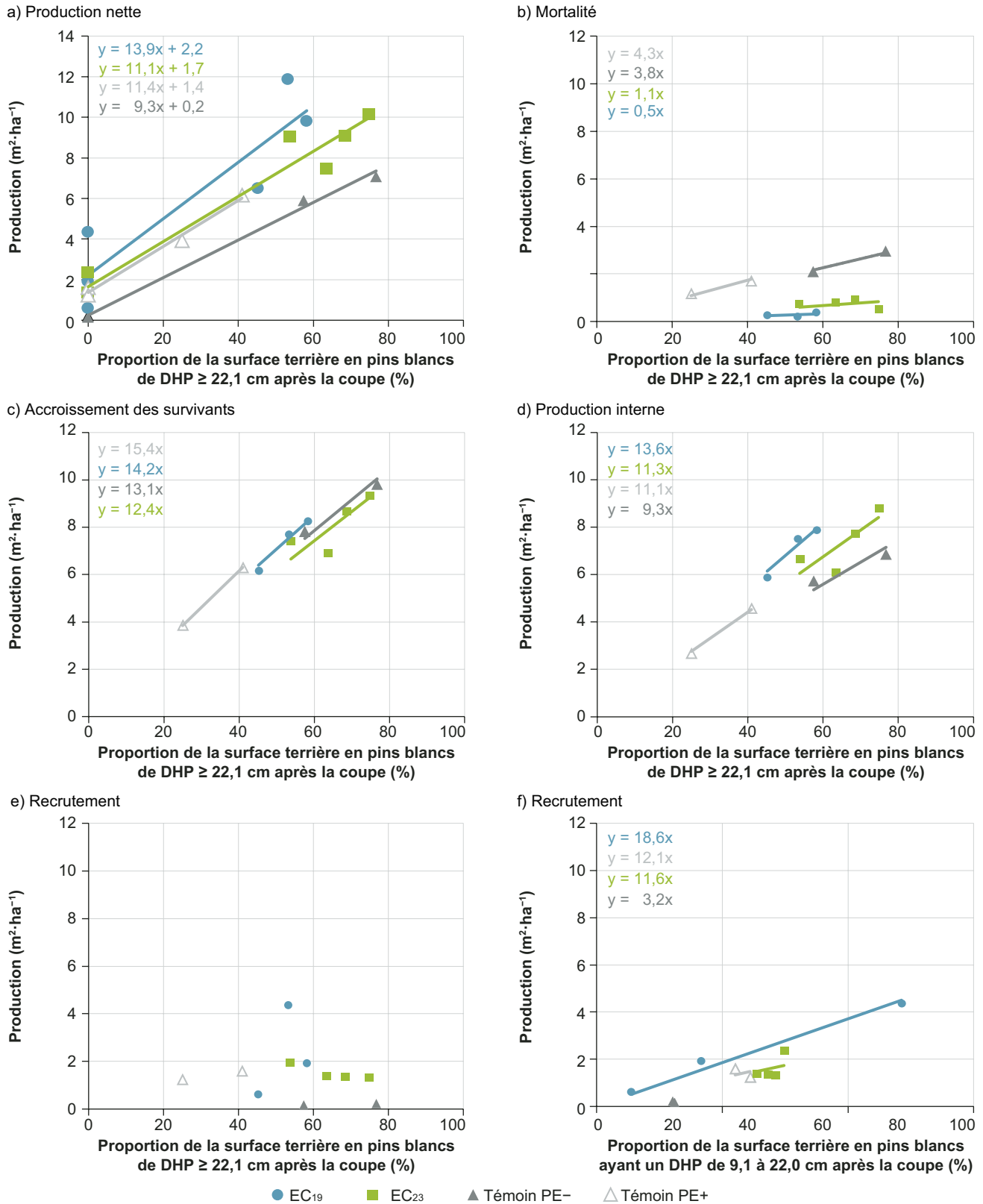


Figure 10. Production par parcelle, pour la période de 25 ans après la coupe, des pins blancs de DHP ≥ 22,1 cm (dimension sciage) en fonction de la proportion de leur surface terrière après la coupe : a) production nette; b) mortalité; c) production par accroissement des survivants; d) production interne; e) recrutement; f) recrutement en fonction de la proportion après la coupe des pins blancs ayant un DHP de 9,1 à 22,0 cm. Les droites de régression ont été forcées de passer par l’origine (sauf à la figure 10a).

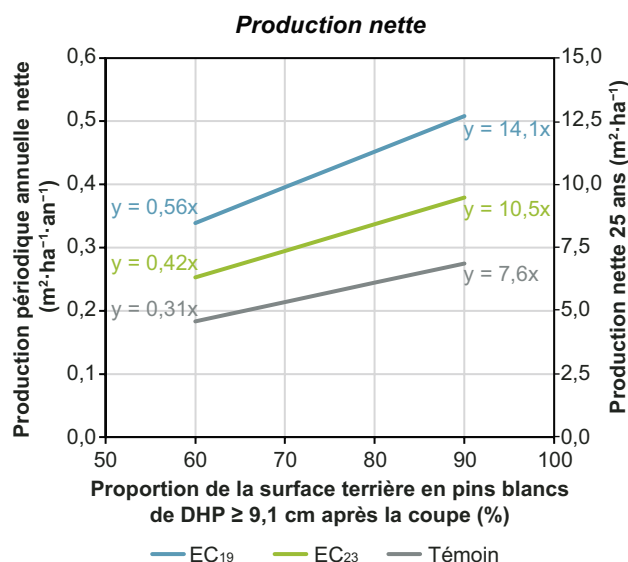


Figure 11. Estimation de la production nette des pins blancs de dimension sciage (DHP $\geq 22,1$ cm) par traitement, pour la période de 25 ans suivant la coupe, en fonction de la proportion de la surface terrière en pins blancs de DHP $\geq 9,1$ cm après la coupe. L'estimation a été calculée avec une répartition de la surface terrière des pins blancs après la coupe de 15 %, 10 %, 40 % et 35 % pour les classes de DHP de 9-22 cm, 22-27 cm, 27-42 cm et ≥ 42 cm, respectivement.

Lorsque la proportion de gros bois est augmentée de 20 % (–10 % pour la classe de DHP de 9-22 cm, –5 % pour celle de 22-27 cm, –5 % pour celle de 27-42 cm et +20 % pour celle de DHP ≥ 42 cm), la production nette estimée diminue pour l'EC19 (–7 %) et l'EC23 (–5 %), alors qu'elle augmente (+15 %) pour le Témoin. La surface terrière des pins ayant un DHP de 27-42 cm après la coupe diminue alors de 36 % (EC19) ou de 28 % (EC23), alors que celle des pins de DHP ≥ 42 cm augmente de 24 %.

2.3.2.3 Taux de production selon la grosseur des pins blancs

Le taux de production (ou productivité) représente la production obtenue après 25 ans (en m^2) par m^2 de surface terrière après la coupe, et ce, par classe de DHP. Des taux de production sont présentés ici pour l'accroissement des survivants, la mortalité et la production interne. La production interne par classe de DHP (différence entre l'accroissement et la mortalité) a été préférée à la production nette (production interne à laquelle on ajoute le recrutement et dont on soustrait le transfert de classe de DHP) afin de mieux cerner la production générée par la surface terrière des pins blancs de chaque classe de DHP.

2.3.2.3.1 Taux de production par accroissement des survivants

Le taux de production par accroissement des survivants a été le plus élevé pour l'EC19, suivie de l'EC23, puis du Témoin (figure 12a). La différence entre les traitements s'estompe avec l'augmentation de la grosseur des pins blancs : l'écart entre l'EC19 et l'EC23 cesse d'être significatif à partir d'un DHP de 44 cm, celui entre l'EC23 et le Témoin cesse de l'être à partir d'un DHP de 46 cm, et celui entre l'EC19 et le Témoin cesse de l'être à partir d'un DHP de 50 cm.

Plus la surface terrière initiale du traitement était faible, plus le taux maximal de production a été élevé, et plus il a été atteint par des pins blancs de petites dimensions. Ainsi, des taux maximaux moyens de 0,93 m^2 , 0,67 m^2 et 0,53 m^2 par m^2 de surface terrière après la coupe (figure 12a) ont été atteints après 25 ans par les pins blancs ayant des DHP de 32 cm, 38 cm et 47 cm pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin, respectivement (annexe 1.4, tableau A1.4.3). Certains pins blancs ayant un DHP de 15 à 30 cm ont produit de 1,5 à plus de 2 fois leur surface terrière initiale en 25 ans (figure 12a).

2.3.2.3.2 Taux de mortalité

Le taux de mortalité a diminué rapidement avec l'augmentation du DHP, jusqu'à des valeurs minimales à un DHP de 43 cm, puis il a recommencé à augmenter (figure 12b). L'ampleur de cette remontée reste toutefois incertaine, car elle pourrait être induite amplifiée par le très petit nombre de pins blancs de gros diamètres.

Plus la surface terrière d'un traitement après la coupe était grande, plus le taux de mortalité a été élevé (figure 12b). Cependant, une différence significative n'a été décelée qu'entre le Témoin et l'EC19 ($p = 0,015$; annexe 1.5, tableau A1.5.2). Ainsi, un pin blanc du traitement Témoin avait 5 fois plus de chance de mourir après 25 ans qu'un pin blanc de l'EC19 (annexe 1.5, tableau A1.5.2 [colonne « rapport de cote »]).

2.3.2.3.3 Taux de production interne

Tout comme pour le taux de production par accroissement des survivants, le taux de production interne a été le plus élevé pour l'EC19, suivie de l'EC23, puis du Témoin (figure 12c). Il a été négatif pour les petites classes de DHP et est devenu positif à des DHP de 15 cm pour l'EC19, de 19 cm pour l'EC23 et de 27 cm pour le Témoin. La différence entre les traitements s'estompe avec l'augmentation de la grosseur des pins blancs; l'écart entre l'EC19 et l'EC23 cesse d'être significatif à partir d'un DHP de 31 cm, celui entre l'EC23 et le Témoin cesse

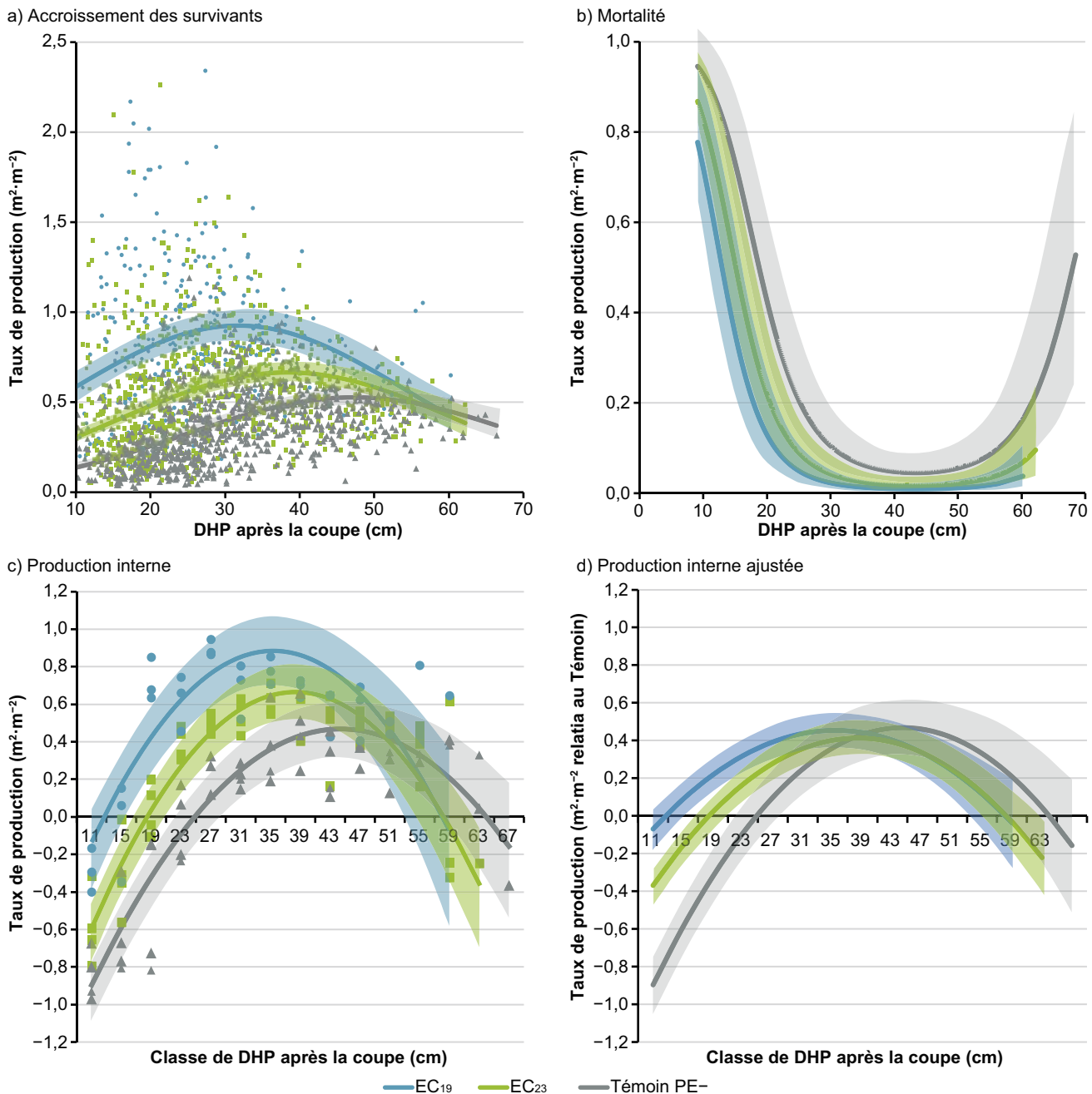


Figure 12. Modélisation du taux de production par traitement (m^2 de production pour la période de 25 ans suivant la coupe par m^2 de surface terrière après la coupe) du pin blanc en fonction du DHP : a) production par accroissement des survivants (chaque point correspond à un arbre); b) mortalité; c) production interne (différence entre l'accroissement et la mortalité; chaque point par classe de DHP correspond à une parcelle); d) production interne ajustée relativement à la surface terrière après la coupe du Témoin PE-. Les bandes de couleur délimitent l'intervalle de confiance de la moyenne à 95 %.

de l'être à partir d'un DHP de 39 cm, et celui entre l'EC19 et le Témoin cesse de l'être à partir d'un DHP 47 cm. Le taux maximal de production interne a été de $0,88 m^2$ par m^2 de surface terrière pour l'EC19, de $0,67 m^2$ par m^2 pour l'EC23 et de $0,47 m^2$ par m^2 pour le Témoin (figure 12c), et ces valeurs ont été atteintes à des DHP de 35, 38 et 44 cm, respectivement (annexe 1.6, tableau A1.6.3). Pour certaines

parcelles, les taux de production interne pour les pins ayant un de DHP de 55 cm et 59 cm ont été presque aussi élevés que ces taux maximaux.

Ces taux de production s'appliquent par m^2 de surface terrière. Lorsqu'on convertit ces taux en tenant compte des différences de surface terrière entre les traitements, les différences entre les

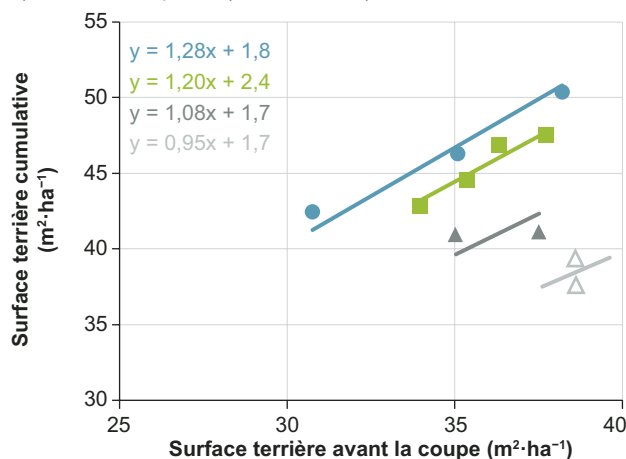
traitements disparaissent à partir de DHP plus petits (environ 25 cm), et les valeurs maximales ne sont plus différentes entre les traitements (figure 12d).

2.3.3. Surface terrière cumulative en 25 ans

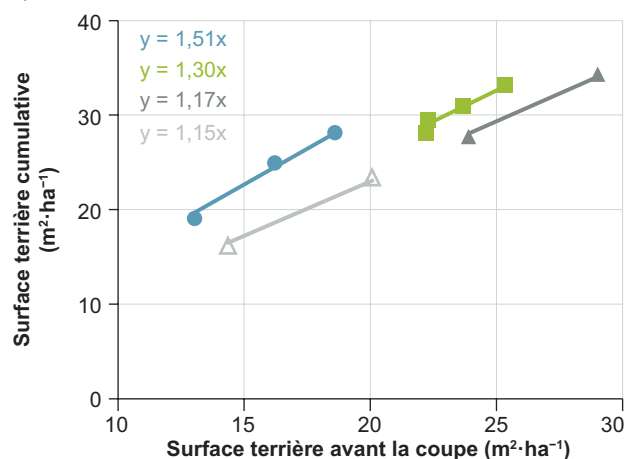
La somme de la surface terrière prélevée lors de la coupe et celle sur pied 25 ans après la coupe, par rapport à celle avant la coupe, permet de connaître la quantité de bois cumulée pour chacun des traitements au cours de la période. Que ce soit pour toutes les espèces (figure 13a) ou seulement le pin blanc (DHP $\geq 9,1$ cm ou DHP $\geq 22,1$ cm; figures 13b et 13c) les traitements d'éclaircie ont généré

davantage de surface terrière (ou de VMB; résultats non présentés) que le Témoin. Par exemple, pour une surface terrière avant la coupe de 35 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$, la surface terrière cumulative pour toutes les espèces aurait été de 46,6 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'EC19 et de 44,4 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'EC23, soit 18 % et 12 % de plus que le Témoin (39,5 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$; figure 13a). Pour les pins blancs de dimension sciage (DHP $\geq 22,1$ cm), la surface terrière cumulative estimée aurait été de 33,1 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'EC19 et de 29,2 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'EC23, soit 30 % et 15 % plus que le Témoin (25,4 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$), pour une surface terrière de ces pins avant la coupe de 20 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (figure 13c).

a) Toutes les espèces (DHP $\geq 9,1$ cm)



b) Pins blancs de DHP $\geq 9,1$ cm



c) Pins blancs de DHP $\geq 22,1$ cm

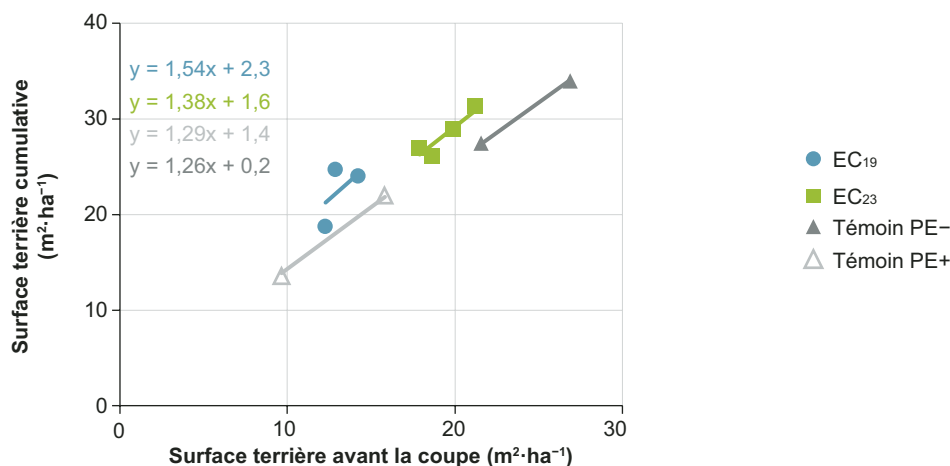


Figure 13. Surface terrière cumulative par parcelle après 25 ans (somme de la surface terrière coupée et de la surface terrière après 25 ans) en fonction de la surface terrière avant la coupe : a) toutes les espèces de DHP $\geq 9,1$ cm; b) pins blancs de DHP $\geq 9,1$ cm; c) pins blancs de DHP $\geq 22,1$ cm. Les droites de régression pour toutes les espèces ont été forcées de passer par l'origine.

Chapitre 3 – Discussion

3.1 Dynamique des espèces

L'évolution de la composition et du nombre de tiges sur une période de 25 ans permet de percevoir la dynamique de ces pinèdes à pin blanc de structure irrégulière (annexe 3) et âgées de plus de 100 ans, d'exposition sud-ouest, poussant sur un dépôt marin sableux et situées dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune.

Le nombre total de pins blancs a diminué avec le temps, surtout à cause de la mortalité importante de ceux de petits diamètres. Cependant, la représentativité de l'espèce au sein du couvert dominant a augmenté en raison de la mortalité d'autres espèces comme les peupliers et l'épinette blanche. La proportion de pin blanc continuera vraisemblablement de se maintenir dans le couvert forestier, car cette espèce conserve une bonne vigueur jusqu'à plus de 200 ans (Brown 1984, Spalding et Fernow 1899, White 1953).

Tant dans les parcelles éclaircies que témoins, les gaules de sapin baumier ont fortement augmenté en 25 ans, de même que celles de hêtre à grandes feuilles, quoiqu'à un degré moindre (figure 4). Par l'ouverture du couvert, l'éclaircie a augmenté la lumière disponible en sous-étage, ce qui a entraîné la prolifération des gaules de feuillus, en particulier d'érable rouge et de peupliers, quoique ces derniers ont vu leur nombre grandement diminuer avec le temps (figure 4). L'éclaircie n'a pas favorisé l'installation d'une nouvelle cohorte de pins blancs; au contraire, le nombre de gaules de pin blanc a chuté après 25 ans, autant pour les traitements d'éclaircie que pour le Témoin (figure 4). Anderson *et al.* (2002) ont observé après 43 ans, durant lesquels 3 éclaircies avaient été pratiquées dans une pinède à pin blanc initialement âgée de 80 ans, qu'aucune tige de pin blanc n'était présente parmi les classes de DHP de 0,1 cm à 2,5 cm et de 2,6 cm à 8,9 cm; par contraste, au niveau de la régénération (hauteur de 16 à 137 cm), le pin blanc était présent seulement pour les traitements avec une surface terrière résiduelle de 18, 23, et 28 m²·ha⁻¹, et non dans celui de 32 m²·ha⁻¹. Dans ce peuplement, l'érable rouge constituait l'espèce de gaules la plus abondante.

Dans la présente étude, la prolifération du sapin baumier et de l'érable rouge à la suite de l'éclaircie dans des pinèdes âgées pose peu de problèmes. Leur présence ne nuira pas à la croissance des pins blancs déjà présents, qui sont beaucoup plus gros;

ces espèces pourraient même participer à leur élagage naturel. Vouloir les couper lors des éclaircies dans l'espoir de favoriser l'installation d'une cohorte de pins blancs semble peu prometteur : d'une part, le couvert n'est pas assez ouvert pour favoriser son installation (OMNRF 2015, Parker 2014), et d'autre part, l'érable rouge va produire des rejets de souche et proliférer. Le pin blanc, avec sa croissance lente durant les premières années, sera supplanté et manquera de lumière pour sa survie, étant donné qu'il pousse déjà sous le couvert des arbres dominants. Lorsque viendra le temps de régénérer le pin blanc, le sapin baumier et l'érable rouge pourront être récoltés et enlevés pour qu'ils ne s'ensemencent pas. Cependant, plus l'érable rouge sera abondant, plus il exercera de concurrence sur la régénération de pins après la coupe de régénération, en raison des rejets qu'il forme une fois coupé. Pour cette raison, il pourrait être avisé, lors des éclaircies, de récolter les petits érables rouges marchands, de même que les petits peupliers marchands. Selon Ducruc et Lafond (1977), ce type de pinède à sapin baumier sur sable fin de la région du Pontiac évoluerait vraisemblablement vers une sapinière à épinette blanche avec pin blanc si aucune perturbation ne survient.

3.2 Croissance des pins blancs

La croissance en diamètre du pin blanc a augmenté à la suite des éclaircies, autant chez les petites tiges que les grosses (figure 6a). Ainsi, les pins blancs de l'EC₁₉ ayant un DHP de 35 cm et plus ont montré des accroissements minimaux et maximaux plus grands que ceux du Témoin, et davantage de pins blancs ont montré de meilleurs accroissements. Cela indique que même les pins blancs dominants et âgés de plus de 100 ans ont réagi à la mise en lumière de leur houppier. En Ontario, Bebber *et al.* (2004) ont observé que les pins blancs (DHP moyen de 55 cm) de pinèdes à pin blanc âgées de plus de 200 ans et laissés sur pied après des coupes partielles, ont montré des accroissements en rayon un peu plus grands (en moyenne de 13,5 % pour les 8 années de suivi après la coupe, mais en constante augmentation) que ceux des secteurs non coupés, même si leurs accroissements avant la coupe étaient faibles (1,5 mm/an en moyenne). En Ontario aussi, Ardenne (1950) mentionne que dans des pinèdes de 80 ans non éclaircies, la croissance en diamètre la plus forte est observée chez les plus gros pins.

Cependant, dans les pinèdes plus jeunes, les plus gros pins blancs éclaircis ne montrent pas de plus forts accroissements que ceux non éclaircis. En effet, dans des pinèdes de 24 à 57 ans, Gillespie et Hocker (1986a) ont observé que l'accroissement en diamètre des pins blancs avait augmenté dans les parcelles éclaircies par rapport aux parcelles témoins pour chacune des classes de DHP, à l'exception de celle des plus gros diamètres (30 cm), et que l'accroissement en surface terrière par arbre avait augmenté jusqu'à la classe de DHP de 20 cm, pour ensuite diminuer jusqu'à celle de 30 cm.

3.3 Rendements selon les traitements

Les résultats montrent que les meilleurs rendements ont été obtenus avec l'éclaircie qui a laissé la surface terrière résiduelle moyenne la plus faible, soit $19,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (figures 7, 9 et 10). Il n'est donc pas possible de déterminer, dans la présente étude, le seuil minimal de surface terrière résiduelle à partir duquel la production aurait été moindre. Quelques études relatent les résultats d'éclaircies dans des pinèdes âgées de près de 100 ans. Celle d'Anderson *et al.* (1984) présente les résultats après 25 ans de plusieurs types d'éclaircies pratiquées dans une pinède à pin blanc et à pin rouge de 80-90 ans en Ontario. La surface terrière résiduelle après l'éclaircie variait de 16 à $26 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Quoique les auteurs ne présentent les résultats de la production nette que sous forme de pourcentage, il a été possible d'en déterminer les valeurs absolues ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) en soustrayant la surface terrière après la coupe de celle à 25 ans (figure 14). Ainsi, la production nette moyenne en surface terrière des parcelles éclaircies était de $12,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour des surfaces terrières résiduelles de 14 à $18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et de $12,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour des surfaces terrières résiduelles de 21 à $26 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, alors que la production nette des parcelles non éclaircies était en moyenne de $7,8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (surfaces terrières résiduelles de 29 à $36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$). Certaines de leurs parcelles éclaircies avec des surfaces terrières résiduelles de 17 - $18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ont eu les productions parmi les plus fortes (de l'ordre de $14 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; figure 14a). Ces rendements sont comparables à ceux de la présente étude pour l'EC19 ($12,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), mais un peu plus élevés que ceux obtenus pour l'EC23 et le Témoin ($9,0$ et $6,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivement), lorsque la proportion de pin blanc est fixée à 100 % (figure 9a). Leur production en surface terrière semble culminer à des surfaces terrières résiduelles d'environ $20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, ce qui tend à montrer que les meilleurs rendements obtenus dans la présente étude avec l'éclaircie de faible surface terrière résiduelle (EC19 : $19 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) pourraient constituer un maximum. Comme dans la présente étude (figure 13), les résultats d'Anderson *et al.* (1984) montrent que la surface terrière cumulative en

25 ans, soit la somme de celle récoltée lors de la coupe et de celle sur pied après 25 ans, est plus grande pour les éclaircies que pour le Témoin, pour une même surface terrière avant la coupe (figure 14b). Lorsque la production est exprimée en volume total plutôt qu'en surface terrière, l'étude d'Anderson *et al.* (1984) montre que l'avantage de l'éclaircie par rapport au Témoin est moins tranché, puisqu'une des 3 parcelles témoins a produit autant de volume que les parcelles éclaircies les plus productives (figure 14c).

Au Minnesota, Anderson *et al.* (2002) présentent les résultats d'une étude comparant 4 traitements d'éclaircie de surfaces terrières résiduelles différentes (18 , 23 , 28 et $32 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans une pinède à pin blanc âgée de 80 ans. Ils ont pratiqué une première éclaircie à 80 ans, une seconde à 85 ans et une dernière à 90 ans, en respectant les surfaces terrières résiduelles ciblées à chacune des interventions. Par la suite, ils ont poursuivi les mesurages pendant 32 ans, sans toutefois pratiquer de nouvelles éclaircies. À des fins de comparaison avec les résultats de la présente étude, les données obtenues pour la période de 32 ans après la dernière éclaircie, alors que la pinède avait 90 ans, ont été sélectionnées. Les rendements en surface terrière ont été de $0,31 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, $0,28 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et $0,40 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, pour des surfaces terrières résiduelles moyennes après la dernière éclaircie de $18,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $22,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $32,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. L'annexe 2 présente la méthode de calcul utilisée pour comparer ces rendements avec ceux de notre étude : les valeurs de surfaces terrières résiduelles de $18,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, $22,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, et $32,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ont été utilisées comme intrants dans le calcul pour l'EC19, l'EC23 et le Témoin, respectivement. De plus, puisque les pinèdes d'Anderson *et al.* (2002) étaient composées à 100 % de pins blancs à 90 ans, avec des DHP variant de $34,8$ à $47,8$ cm et des DHP moyens quadratiques variant de $41,4$ à $45,0$ cm, la proportion de pins blancs pour le calcul des estimations a été fixée à 100 %, en supposant qu'ils soient répartis à 20 % dans la classe de DHP de 27 - 42 cm et à 80 % dans celle de DHP ≥ 42 cm. Les rendements ainsi estimés sont de $0,37 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, $0,28 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et $0,29 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Les différences de rendements par rapport à l'étude d'Anderson *et al.* (2002) pourraient s'expliquer par les grandes différences dans la composition et la structure diamétrale des pinèdes qu'ils ont étudiées comparativement à celles de la présente étude : les premières sont composées à 100 % de pins blancs, leur structure diamétrale est régulière, leur pins blancs sont dominants et codominants, leur DHP moyens sont beaucoup plus grands (35 - 48 cm comparativement à 21 - 27 cm dans la présente

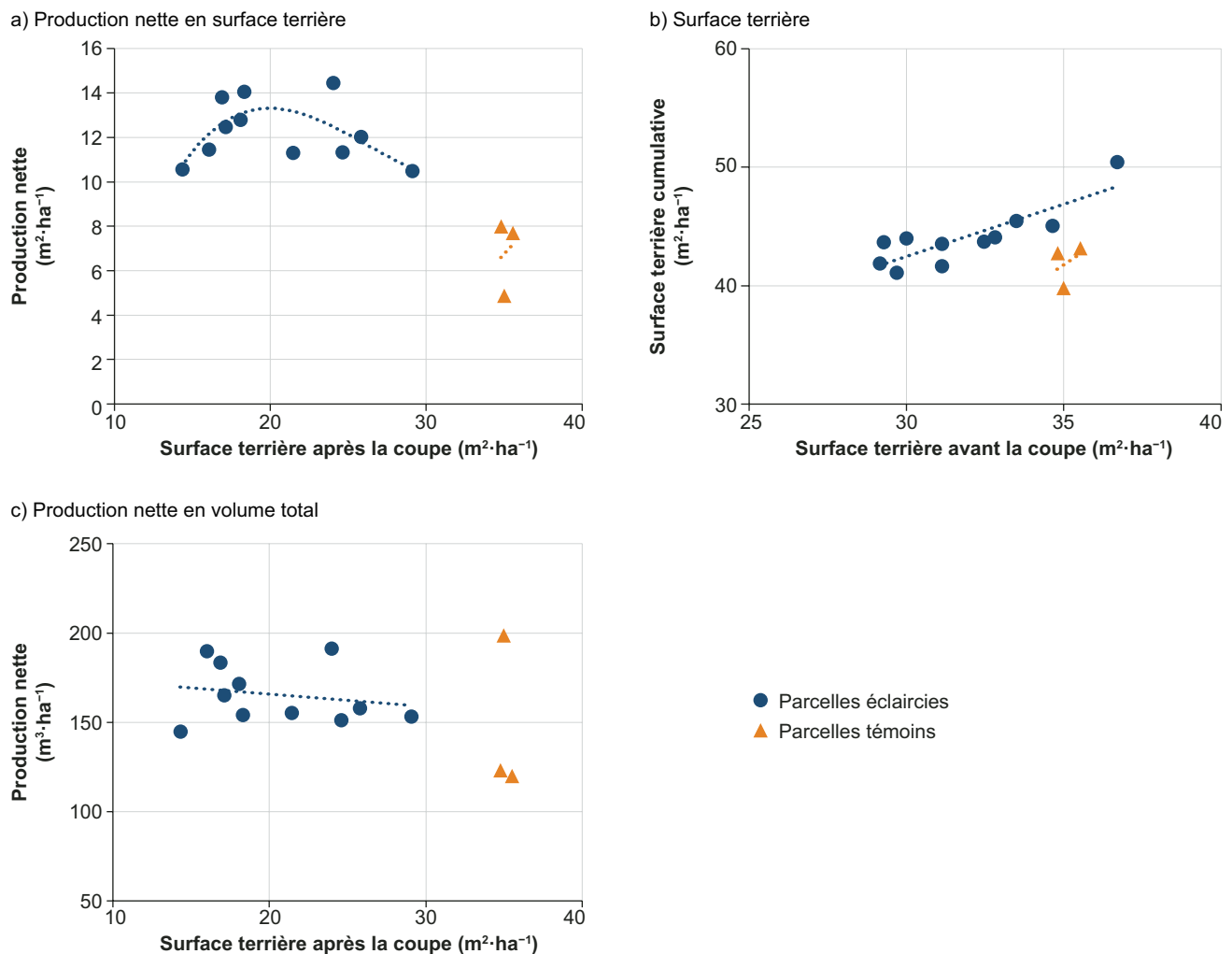


Figure 14. Production nette en surface terrière (a) et en volume (c), et surface terrière cumulative (coupée et sur pied à 25 ans) 25 ans après la coupe (b) en fonction de la surface terrière après la coupe, pour les parcelles éclaircies et témoins d'une pinède à pin blanc et à pin rouge de 80-90 ans (valeurs calculées à partir des données présentées dans Anderson *et al.* 1984). Les courbes en pointillé représentent une fonction polynomiale de degré 3 dans le cas de la surface terrière, et de degré 2 dans le cas du volume.

étude), et leur nombre moyen de tiges est beaucoup plus petit (139–293 tiges·ha⁻¹ comparativement à 472–676 tiges·ha⁻¹; tableau 2).

Des rendements plus grands ont été rapportés dans d'autres études portant sur des pinèdes à pin blanc plus jeunes. Par exemple, 8 ans après l'éclaircie dans de jeunes peuplements de 24 à 57 ans au New Hampshire, des rendements moyens de 1,3 m²·ha⁻¹·an⁻¹ (de 0,9 à 1,5 m²·ha⁻¹·an⁻¹ selon les parcelles) ont été obtenus avec des surfaces terrières résiduelles moyennes de 29 m²·ha⁻¹ (de 19 à 39 m²·ha⁻¹·an⁻¹ selon les parcelles; Gillespie et Hocker 1986a). Dans une pinède de 35 ans au New Hampshire, Hawley (1927) a obtenu des rendements de 0,89 et 0,63 m²·ha⁻¹·an⁻¹ respectivement pour la parcelle éclaircie (surface terrière résiduelle : 26 m²·ha⁻¹) et la parcelle témoin (36 m²·ha⁻¹) sur une période de 10 ans; puis, à la suite de 2 autres

éclaircies pratiquées à 5 ans d'intervalle, ce rendement a augmenté à 1,23 m²·ha⁻¹·an⁻¹ pour la parcelle éclaircie durant les 5 années suivant la dernière intervention, alors que le rendement de la parcelle témoin n'a pas changé.

Dans la présente étude, lors du mesurage 25 ans après la coupe, le houppier de certains pins blancs dominants était un peu dégarni. Cette perte de feuillage est vraisemblablement attribuable à des maladies des aiguilles, telles que la brûlure en bandes brunes et la brûlure des aiguilles (MFFP 2018b). Il y a eu une recrudescence de ces maladies quelques années plus tôt dans la région de l'Outaouais (MRN 2013); ces maladies affectent aussi le pin blanc dans le nord-est des États-Unis (Wyka *et al.* 2017). Cette perte de feuillage peut

avoir contribué à diminuer la croissance des pins durant les dernières années, et par conséquent, leur rendement (McIntire *et al.* 2018a, 2018b).

3.4 Aménager les pinèdes à pin blanc pour la production de gros pins

Si l'objectif d'aménagement est de maximiser la quantité et la valeur de la production en pin blanc, la production de pins blancs de grandes dimensions (DHP \geq 42 cm) semble le meilleur choix. En effet, la croissance moyenne en diamètre des pins blancs n'a pas diminué avec l'augmentation de la grosseur des pins; au contraire, elle a augmenté jusqu'à des DHP de plus de 50 cm (figure 6a). Ainsi, après 25 ans, un pin blanc de 40 cm a atteint en moyenne un DHP de 50 cm pour l'EC₂₃ et de 52 cm pour l'EC₁₉. Exprimée en surface terrière par arbre, la croissance a été encore plus soutenue que celle en diamètre, et la relation ne montre aucun fléchissement du taux de croissance jusqu'à des grosseurs de 60 cm (figure 6b). Par cette croissance en diamètre soutenue en fonction de leur grosseur, ce sont les classes de DHP de 35 et 39 cm qui ont produit le plus de m² par unité de surface terrière après l'éclaircie, et ces valeurs demeurent élevées jusqu'à des DHP de 45 cm (figure 12c). Afin d'obtenir un rendement maximal, il semble donc avantageux de conserver une majorité de pins blancs ayant des DHP de 30 à 45 cm après l'éclaircie, car ce sont ces derniers qui produiront un maximum de surface terrière par m² 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, mais aussi en fonction de sa valeur par m³. Alors que le volume de bois augmente graduellement avec la grosseur de l'arbre, la valeur par m³ 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 d'au moins 22, 27 et 42 cm correspondaient aux critères minimaux de grosseur pour les classes de qualité I, H et G pour la bille de pied (tableau 1). En faisant abstraction des défauts, la valeur par m³ progresse donc par paliers plutôt que de manière continue, comme dans le cas du volume. 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 valeur se fera par l'augmentation du volume. Par exemple, dans la zone 751 de tarification des bois dans laquelle se situe la présente pinède, la valeur marchande est de 29,33 \$/m³ pour les billes de qualité G, de 16,80 \$/m³ pour celles de qualité H et de 12,10 \$/m³ pour celles de qualité I (BMMB 2020).

Pour un pin blanc sans défauts majeurs avec un DHP de 25 cm, dont la bille de pied est de qualité de sciage I, une augmentation de DHP de 2 cm, faisant passer la bille de pied à la classe de qualité H en raison de son diamètre, augmenterait la valeur de celle-ci de 4,70 \$/m³ (+39 %). De même, pour un pin blanc sans défauts majeurs dont la bille de pied passerait d'un DHP de 40 cm (qualité H) à 42 cm (qualité G), la valeur de la bille de pied augmenterait de 12,53 \$/m³ (+75 %) en raison du changement de classe de qualité. Ces exemples illustrent bien combien la valeur de la bille de pied peut augmenter pour un pin blanc qu'on laisse pousser et qui accéderait à une classe de qualité supérieure lors de la prochaine récolte.

Dans des pinèdes âgées de 100 ans et plus, il semble donc justifié, lors d'une éclaircie, de laisser sur pied un maximum de pins blancs ayant des DHP de 30 à 45 cm et une qualité suffisante pour éventuellement produire une bille de pied de qualité G, tout en favorisant un espacement régulier entre les arbres. En 25 ans, la surface terrière des pins blancs ayant les dimensions pour produire de telles billes (DHP \geq 42 cm) a doublé, de sorte qu'elle constitue plus de 60 % de la surface terrière totale en pin blanc (figure 5). Pour maximiser la production de pins blancs de dimension sciage, une surface terrière totale résiduelle de 18 à 20 m²·ha⁻¹ lors d'une première éclaircie semble préférable à une surface terrière de 22 à 24 m²·ha⁻¹ (figure 10a). Avec cette option, plus de la moitié des pins blancs ayant des DHP de 30 à 34 cm pourraient dépasser le DHP seuil de 42 cm après 25 ans, et 90 % des pins blancs pourraient atteindre des DHP de 34 à 38 cm (annexe 6).

3.5 Éclaircies successives et retardement de la coupe finale

Afin d'équilibrer les structures d'âge des pinèdes à pin blanc au Québec dans lesquelles un déficit de jeunes pinèdes est présent, et afin de régulariser l'approvisionnement en bois dans le temps, l'étalement dans le temps de la récolte de ces pinèdes d'un peu plus de 100 ans par des éclaircies afin de retarder la coupe finale est préconisé (Nappi 2013). Les résultats de la présente étude tendent à montrer que la pratique de l'éclaircie permettrait à ces pinèdes de rester productives dans le temps à mesure que la dimension des pins augmente. Le retardement de la coupe finale au-delà de la maturité absolue semble donc une pratique adaptée aux pinèdes à pin blanc âgées.

En effet, la présente étude montre que la croissance moyenne en diamètre des pins blancs augmente avec leur grosseur, et ce, jusqu'à des DHP

de plus de 60 cm (figure 6a). Certains pins ayant un DHP de 50 cm ont montré des croissances en diamètre parmi les plus fortes. Leur croissance en surface terrière est encore plus soutenue à mesure que leur DHP augmente; ce taux de croissance ne montre d'ailleurs aucun ralentissement pour toute l'étendue des DHP des pins de la présente étude (figure 6b). White (1953) a observé que la croissance décennale en volume des pins blancs culminait à des âges de 190 ans dans des pinèdes naturelles en Ontario. Brown (1984) montre aussi l'exemple d'un pin blanc opprimé pendant plus de 60 ans dont le diamètre, une fois l'arbre dégagé, a crû de 8 cm en moyenne par décennie jusqu'à l'âge de 150 ans. Son DHP était alors de plus de 75 cm, et son accroissement courant annuel en volume n'avait cessé d'augmenter jusqu'à cet âge. Cela montre le potentiel de cette espèce à soutenir une forte croissance à mesure que le diamètre et l'âge augmentent.

En plus d'une forte croissance en diamètre, le taux de mortalité des pins blancs dans les parcelles éclaircies a diminué avec l'augmentation du DHP jusqu'à des valeurs presque nulles pour des DHP de 50 cm (figure 12b). Ce taux a légèrement augmenté par la suite, probablement en raison du faible nombre de pins blancs de plus de 50 cm de diamètre après l'éclaircie. D'ailleurs, si l'on sélectionne les pins blancs vigoureux exempts de défauts comme arbres d'avenir lors des éclaircies futures, la mortalité de ces gros pins sera vraisemblablement très faible avec le temps. Ce faible taux de mortalité vient aussi appuyer l'idée qu'un report de la coupe finale des pinèdes à pin blanc est une pratique sylvicole adaptée à ces peuplements.

Le rythme de croissance en hauteur des pins influence grandement celui du développement de leur houppier, ce qui se répercute sur la croissance en diamètre (Lane 1959). Ainsi, plus la croissance en hauteur est forte, plus le houppier est dynamique et plus il peut se développer, ce qui favorise d'autant la croissance en diamètre. La courbe de la croissance en hauteur des pins blancs en fonction de leur DHP montre que ceux de DHP < 50 cm ont encore une croissance en hauteur très active (annexe 1, figure A1.1.1) et qu'ils peuvent atteindre des hauteurs de plus de 35 m sur cette station. Pour des indices de qualité de station de 18 m à 50 ans, Plonski (1974) estime à 1,8 m leur croissance moyenne pour la décennie de 90 à 100 ans, mais de 2 fois moins (0,8 m) pour celle de 130 à 140 ans. Pour Woods et Miller (1996), cette croissance serait de 2,2 m de 90 à 100 ans et ralentirait à 1,6 m pour la décennie de 130 à 140 ans.

Dans une approche d'étalement de la coupe finale, la pratique d'éclaircies successives semble nécessaire pour permettre aux houppiers de se développer et pour conserver la vigueur du peuplement dans le temps. D'une part, le houppier se développera en longueur, par l'arrêt de la mortalité des branches basses, à cause de l'augmentation de la pénétration de la lumière à l'intérieur du peuplement. D'autre part, il se développera aussi en largeur, en profitant de l'espace disponible pour la croissance en longueur des branches. Toutefois, même si le houppier conserve sa capacité à se développer, il y a un avantage à pratiquer la première éclaircie le plus tôt possible dans ces peuplements âgés : le houppier sera alors plus dynamique, la vigueur des pins augmentera davantage et perdurera plus longtemps. La croissance moyenne en diamètre des pins est susceptible d'augmenter avec le temps, d'une part parce que les pins non vigoureux seront enlevés lors des éclaircies successives, et d'autre part, parce que leur houppier se développera. Ces éclaircies successives éviteront que le peuplement ne devienne trop dense. Déjà, 25 ans après l'éclaircie, la surface terrière de la pinède dépassait les $30 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, ce qui la rapproche du seuil d'auto-éclaircie défini par Smith et Woods (1997) (annexe 4). D'ailleurs, la production nette a commencé à diminuer pour la période de 11-25 ans après l'éclaircie, comparativement à celle de 1-10 ans, l'écart étant plus marqué pour l'EC₂₃ que pour l'EC₁₉ (figure 8a).

Lors de la première éclaircie pratiquée dans une pinède âgée, il semble plus approprié de réduire la surface terrière à des valeurs d'environ $18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ plutôt que de $23 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Cette surface terrière plus petite offre une plus grande latitude pour enlever les d'espèces non désirées de même que les arbres peu vigoureux et défectueux. Elle permet aussi d'augmenter davantage l'espacement entre les arbres afin qu'ils retrouvent rapidement leur vigueur, après que celle-ci ait diminué à cause de la grande densité atteinte par ces pinèdes non aménagées et dans lesquelles la mortalité par auto-éclaircie était déjà amorcée (tableau 5, annexe 5). De plus, cette plus faible densité ($18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) a permis d'augmenter d'environ 10 % la proportion du fût sans branches mortes (annexe 5b). Ce gain de vigueur des pins est majeur et contribue à maintenir des rendements élevés à long terme. Dans des pinèdes à structure irrégulière comme celle de la présente étude, les nombreux pins plus petits occupant l'étage intermédiaire ont grandement profité de l'éclaircie EC₁₉ pour développer leur houppier (annexe 5b) et augmenter leur croissance en diamètre (figure 6a). Ces arbres contribueront à maintenir ces pinèdes âgées productives et pourront devenir des pins de grande dimension (Brown 1984).

La pratique de l'éclaircie peut donc augmenter la vigueur des pins blancs de même que celle de la pinède, avec le temps, en autant que la priorité de récolte lors des éclaircies soit donnée aux arbres peu vigoureux et à ceux présentant des défauts majeurs. Dans ce contexte, une attention particulière devra être portée à la détection de la carie blanche alvéolaire causée par le champignon *Porodaedalea pini* (Brotero) Murrill. En effet, la prévalence de cette carie augmente avec l'âge du peuplement, en particulier chez les pins peu vigoureux et montrant une faible croissance (Bouchard *et al.* 2013, Livingston *et al.* 2019, White 1953). Rappelons que le symptôme de cette maladie chez les pins blancs est la présence de nœuds renflés avec des coulures fraîches de résine (Bouchard *et al.* 2013). Lors de l'éclaircie, les arbres atteints par cette carie devraient être coupés et transportés hors de la forêt, pour éviter que les troncs laissés sur le parterre de coupe ne deviennent des sources de propagation de la maladie (Bouchard *et al.* 2013). D'un point de vue écosystémique, cette carie permet la création d'arbres à valeur faunique en détruisant la partie centrale du tronc, tout en laissant intacte la partie externe. Dans les pinèdes de la présente étude, cette maladie semble avoir été très peu présente.

Prolonger la croissance de ces pinèdes par des éclaircies augmente la valeur marchande des pins blancs, non seulement parce que ceux exempts de défauts auront été laissés sur pied, mais aussi à cause de leur dimension. En effet, 25 ans après cette première éclaircie, la surface terrière des pins blancs de DHP ≥ 42 cm a doublé pour constituer plus de 60 % de la surface terrière pour cette espèce (figure 5), le recrutement ayant contribué en moyenne pour 75 % de cette augmentation dans les parcelles éclaircies (section 2.1.4). Ainsi, chacun des pins blancs de qualité qui atteint les dimensions pour produire une bille de la meilleure qualité G (DHP ≥ 42 cm) augmente considérablement la valeur par m³ de sa bille de pied (voir BMMB 2020). Même après l'atteinte de ce DHP, sa valeur continuera d'augmenter à mesure qu'il grossira. De plus, la qualité des sciages issus de chacun des pins augmentera vraisemblablement avec le temps, d'une part par l'augmentation du volume de bois exempt de nœuds dans la portion élaguée du fût, et d'autre part, par la production accrue de bois sans nœuds lâches, puisque les éclaircies ont diminué la proportion du fût présentant des branches mortes (annexe 5b).

Dans un scénario où les éclaircies seraient étalées sur plus de 50 ans dans des pinèdes âgées, la pratique d'un élagage dès la première éclaircie, chez les pins blancs qui demeureront sur pied jusqu'à la coupe finale, pourrait s'avérer pertinent (Horton 1966). D'après les valeurs de l'EC₁₉, pour

laquelle la mortalité des branches basses a vraisemblablement été minimale en 25 ans, la longueur du fût est de plus de 10 m (médiane d'environ 15 m; annexe 5a), soit de 50 % à 70 % de la hauteur totale (annexe 5b). Il n'y aurait donc pas besoin d'élaguer des branches vivantes, puisqu'il faut conserver une proportion de houppier d'au moins 30 % de la hauteur de l'arbre pour maintenir sa vigueur. Cependant, il serait probablement avantageux d'enlever les branches mortes, puisqu'elles occupent près de la moitié de la longueur du fût chez environ la moitié des pins (annexe 5b); c'est justement le type de nœuds produit par ces branches mortes qui cause le plus de perte de qualité des sciages (NELMA 2017, Smith et Seymour 1986). Puisque l'élagage manuel avec une perche sera insuffisant en raison de la hauteur de ces branches, l'utilisation de robots élagueurs est de mise (1971Leroy 2011, Advaligno PATAS 2021, Anne et Bachoua 1986, Flammarion 1984).

Au cours des éclaircies successives, il est important de veiller à ne pas blesser les pins résiduels lors du débusquage des arbres, car la plus grande valeur de l'arbre se trouve dans sa bille de pied. Ainsi, Whitney et Brace (1979) ont remarqué, 5 ans après la coupe, que le tiers des pins blancs qui avaient subi une blessure à la bille de pied (écorce enlevée sur plus de 25 % de la circonférence, sur une surface de plus de 163 cm² ou sur une longueur de plus de 30 cm) lors du débusquage montraient de la présence de carie. Cette proportion atteignait 50 % après 10 ans (Whitney 1991). Les blessures au tronc qui s'étendent jusqu'au sol, de même que les bris causés au sommet des houppiers, ont représenté les plus importantes blessures associées à de la carie, 10 ans plus tard.

Dans un objectif d'étaler dans le temps les éclaircies et en retardant la coupe finale, les éclaircies pourraient être pratiquées à intervalles de 25 ans. L'objectif recommandé de surface terrière résiduelle serait alors de 18-20 m²·ha⁻¹ à la première éclaircie et pourrait augmenter à mesure que le DHP moyen des pins blancs augmente (Leak et Lamson 1999, Seymour et Smith 1987). Selon le temps nécessaire pour équilibrer les classes d'âge des pinèdes à pin blanc au Québec, il est pensable d'étaler la coupe de régénération jusqu'à 180 ans sans diminuer la croissance en volume des gros pins blancs (White 1953). Ainsi, jusqu'à 3 éclaircies pourraient être pratiquées si la première est réalisée dans une pinède d'une centaine d'années. Lors de ces éclaircies, il est important de bien sélectionner les tiges d'avenir vigoureuses, entre autres par la détection des pins blancs atteints par la carie blanche alvéolaire. De plus, il faut éviter de blesser les tiges d'avenir lors des opérations d'abattage et de débusquage.

Conclusion et recommandations

Après 25 ans, le nombre total de pins blancs a diminué dans les peuplements étudiés, principalement à cause de la mortalité importante des pins de petits diamètres; cependant, la représentativité de l'espèce au sein du couvert dominant a augmenté. L'éclaircie n'a pas favorisé l'installation d'une nouvelle cohorte de pins blancs, de sorte que le nombre de gaules de pin blanc a grandement diminué après 25 ans. En revanche, l'intervention a engendré une prolifération des gaules de feuillus, en particulier pour l'érable rouge et les peupliers, quoique ces derniers ont grandement diminué en nombre avec le temps. Les gaules de sapin baumier ont aussi fortement augmenté en 25 ans, autant dans les parcelles éclaircies que témoins.

L'éclaircie de ces pinèdes de structure irrégulière, âgées de plus de 100 ans et avec des surfaces terrières initiales de 35-40 m²·ha⁻¹ a été un bon choix sylvicole. En effet, le pin blanc a réagi favorablement à la baisse de densité et sa croissance en diamètre a augmenté, même chez les pins blancs dominants. Les meilleurs rendements (plus de 2 fois ceux du Témoin) ont été obtenus avec l'éclaircie qui a laissé la plus petite surface terrière résiduelle (19 m²·ha⁻¹). De même, la surface terrière cumulative en pin blanc (somme de la surface terrière récoltée lors de la coupe additionnée et de celle sur pied 25 ans après la coupe) a été plus grande pour l'une ou l'autre des éclaircies que pour le Témoin. Vingt-cinq ans après la coupe, la surface terrière en pin blanc dépassait celle d'avant la coupe dans chacune des parcelles éclaircies.

Lorsque l'objectif d'aménagement est de maximiser la quantité et la valeur de la production en pin blanc, la production de pins blancs de grandes dimensions (DHP ≥ 42 cm) semble le meilleur choix. En effet, la croissance en diamètre a augmenté avec la grosseur des pins blancs jusqu'à des DHP de plus de 60 cm, et la croissance individuelle en surface terrière n'a montré aucun fléchissement. Les pins blancs qui ont produit le rendement le plus grand par m² de leur surface terrière après l'éclaircie étaient ceux avec un DHP de 35 à 45 cm. La valeur de la bille de pied d'un pin blanc sans défauts majeurs qui atteint un DHP ≥ 42 cm voit la valeur par m³ de sa bille de pied presque doubler par rapport à celui de 40 cm, car il atteint le DHP minimal pour changer de classe et atteindre celle de la plus haute qualité de sciage.

L'étalement dans le temps de la coupe finale par la pratique d'éclaircies successives dans ces pinèdes à pin blanc âgées semble adapté à ce type de peuplement, puisque d'après l'analyse de nos observations,

leur production ne devrait pas diminuer dans le temps. Pour le Québec, alors que la proportion de jeunes pinèdes est nettement déficitaire par rapport à celle des pinèdes plus âgées, cette pratique pourrait permettre de rééquilibrer les classes d'âges en procurant le temps nécessaire pour générer de jeunes pinèdes avant la coupe finale des pinèdes matures. Ainsi, lorsque la première éclaircie est réalisée dans une pinède d'une centaine d'années, il paraît adapté de pratiquer 2 autres éclaircies à intervalles de 25 ans, pour ainsi étaler la coupe de régénération jusqu'à environ 180 ans. Les pins blancs de gros diamètre montrent un fort potentiel de croissance en diamètre. Cette croissance est susceptible d'augmenter avec le temps, puisque la pratique d'éclaircies successives permettra aux houppiers de se poursuivre leur développement, et que l'augmentation de la vigueur des pins permettra de maintenir des rendements élevés. La valeur marchande des pins blancs augmentera aussi avec le temps, si l'on prend soin de ne pas les blesser lors des opérations d'éclaircie et d'enlever ceux qui sont atteints de la carie blanche alvéolaire.

Vu les résultats obtenus, certaines recommandations peuvent être énoncées afin de maximiser la production de pin blanc lors de l'éclaircie commerciale dans des pinèdes non aménagées, de structure irrégulière et âgées d'une centaine d'années :

- 1- Laisser une surface terrière résiduelle de 18 m²·ha⁻¹ afin de stimuler la vigueur du peuplement, en particulier lorsque l'objectif est d'étaler dans le temps l'âge où la coupe de régénération sera pratiquée;
- 2- Prélever les arbres peu vigoureux et défectueux, les espèces qui présentent un taux de mortalité élevé après l'éclaircie (bouleau à papier, sapin baumier, épinettes blanches ayant un DHP de 35 cm et plus, etc.) ainsi que les espèces dont l'âge de maturité biologique est atteint, comme cela a été le cas pour les peupliers;
- 3- Tout en visant à espacer les houppiers des arbres résiduels, favoriser le maintien sur pied des pins blancs d'avenir ayant un DHP de 30 à 45 cm. Ces pins procureront le meilleur rendement par m² de surface terrière résiduelle et produiront des billes de pied de grande valeur;
- 4- Accorder une attention particulière à la détection des pins blancs atteints par la carie blanche alvéolaire causée par le champignon *Porodaedalea pini*, dont l'incidence augmente avec l'âge des pinèdes.

Références bibliographiques

- 1971Leroy, 2011. *Pruning trees with the Clouston Tree Pruner*. Vidéo publiée sur YouTube le 6 octobre 2011. https://www.youtube.com/watch?v=kJVz8N_PJ2E
- Advaligno PATAS, 2021. *Machine*. Site Internet. <https://www.advaligno.com/en/machine/>
- Anderson, P.D., J.C. Zasada, G.W. Erickson et Z.A. Zasada, 2002. *Thinning in mature eastern white pine: 43-year case study*. For. Chron. 78(4): 539-549. <https://doi.org/10.5558/tfc78539-4>
- Andison, D., P. Roebbelen et A.F. Beckwith, 1984. *Initial thinning in a semi-mature white and red pine stand*. Ontario Ministry of Natural Resources, Tree Improvement and Forest Biomass Institute. Research Note n° 35. 4 p.
- Anne, R. et A. Bachoua, 1986. *Une solution à l'élagage en hauteur : le robot élagueur*. La Forêt privée 170: 35-44.
- Ardenne, M., 1950. *Growth of second growth red and white pine in southeastern Ontario*. Ontario Department of Lands and Forests. Toronto, ON. Research Report n° 18. 13 p.
- Bebber, D.P., S.C. Thomas, W.G. Cole et D. Balsillie, 2004. *Diameter increment in mature eastern white pine Pinus strobus L. following partial harvest of old-growth stands in Ontario, Canada*. Trees 18: 29-34. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0274-y>
- Berry, A.B., 1959. *Some effects of removing the hardwoods from a stand of aspen and white pine*. Government of Canada, Department of Northern Affairs and National Resources, Forestry Branch, Forest Research Division. Silvicultural Research Note, Project P-129. 10 p.
- [BFEC] Bureau du forestier en chef, 2009. *Le rétablissement des forêts de pin blanc*. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef. Avis du forestier en chef au ministre des Ressources naturelles et de la Faune. 2 p. https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2012/12/FEC-FIC-AVIS_Pinblanc_V2_1.pdf
- [BFEC] Bureau du forestier en chef, 2019. *Détermination 2018-2023. Synthèse provinciale. (Mise à jour — Novembre 2019)*. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef. 6 p. https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2019/11/rxx_synthese_provinciale_nov_2019.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. 18 p. https://bmmmb.gouv.qc.ca/media/52097/4-taux_1janvier-31mars2020.pdf
- Bouchard, J., L. Innes, B. Boulet et C. Godbout, 2013. « La carie blanche alvéolaire du tronc ». Dans : *Le guide sylvicole du Québec Tome 1 — Les fondements biologiques de la sylviculture*. Les publications du Québec. Québec, QC. p. 652-657.
- 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
- Bowen, M.G., 1962. *Plots one, two and forty-nine, a thinning experiment in white and red pine*. Government of Canada, Department of Forestry, Forest Research Branch, Petawawa Forest Experiment Station document n° 62-15, Chalk River, ON. Project P-118. 35 p.
- Brown, J.-L., 1984. *Testament d'un vieux pin blanc*. For. Chron. 60(5) : 269-272. <https://doi.org/10.5558/tfc60269-5>
- Brown, J.-L., 1994a. *White pine management in the Ottawa River area of Quebec*. For. Chron. 70(4): 437-441. <https://doi.org/10.5558/tfc70437-4>
- Brown, J.-L., 1994b. *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>
- Buckman, R.E. et Z.A. Zasada, 1960. *Five-year results of growing-stock density study in 85-year-old white pine*. U.S.D.A. Forest Service, Lake State Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Technical Note n° 589. 2 p.

- 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>
- Calama, R. et G. Montero, 2005. *Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in stone pine (Pinus pinea): A calibrating approach*. Silva Fenn. 39(1): 37-54. <https://doi.org/10.14214/sf.394>
- Casselmann, C.N., T.R. Fox et J.A. Burger, 2007. *Thinning response of a white pine stand on a reclaimed surface mine in Southwestern Virginia*. North. J. Appl. For. 24(1): 9-13. <https://doi.org/10.1093/njaf/24.1.9>
- Cochran, W.G., 1977. *Sampling techniques—3rd edition*. John Wiley & Sons, New York, NY (États-Unis). 448 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>
- Ducruc, J.-P. et A. Lafond, 1977. *Les pinèdes à pin blanc de la vallée de la rivière de l'Aigle, Pontiac, Québec*. Nat. Can. 104: 325-339.
- Flammarion, J.-P., 1984. *Élagage au robot des résineux à croissance rapide*. Rev. For. Fr. 36(4): 343-350. <https://doi.org/10.4267/2042/21745>
- Gillespie, A.R. et H.W. Hocker, Jr., 1986a. *Thinning response of immature white pine*. North. J. Appl. For. 3(4): 148-150. <https://doi.org/10.1093/njaf/3.4.148>
- Gillespie, A.R. et H.W. Hocker, Jr., 1986b. *The influence of competition on individual white pine thinning response*. Can. J. For. Res. 16(6): 1355-1359. <https://doi.org/10.1139/x86-239>
- 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 Nominingue*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers. 188 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-3ab.pdf>
- Guiterman, C.H., A.R. Weiskittel et R.S. Seymour, 2011. *Influences of conventional and low-density thinning on the lower bole taper and volume growth of eastern white pine*. North. J. Appl. For. 28(3): 123-128. <https://doi.org/10.1093/njaf/28.3.123>
- Harmon, M.E. et B. Marks, 2002. *Effects of silvicultural practices on carbon stores in Douglas-fir-western hemlock forests in the Pacific Northwest, U.S.A.: results from a simulation model*. Can. J. For. Res. 32(5): 863-877. <https://doi.org/10.1139/x01-216>
- Hawley, R.C., 1927. *A second progress report of the results secured in treating pure white pine stands on experimental plots at Keene, New Hampshire*. Yale University, School of Forestry and Environmental Studies. New Haven, CT (États-Unis). Bulletin n° 20. 23 p. https://elischolar.library.yale.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=yale_fes_bulletin
- Hawley, R.C., 1936. *Observations on thinning and management of eastern white pine (Pinus strobus Linnaeus) in southern New Hampshire*. Yale University, School of Forestry and Environmental Studies. New Haven, CT (États-Unis). Bulletin n° 42. 16 p. https://elischolar.library.yale.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1041&context=yale_fes_bulletin
- Heiberg, S.O., 1945. *Does economic cutting pay?* J. For. 43(2): 109-112.
- Horton, K.W., 1966. *Profitability of pruning white pine*. For. Chron. 42(3) : 94-305. <https://doi.org/10.5558/tfc42294-3>
- Hunt, F.M. et D.L. Mader, 1970. *Low density management—a means to increase timber yields while using less soil moisture*. Massachusetts Agricultural Experiment Station, Amherst, MA (États-Unis). Bulletin n° 588. 24 p.
- Huot, M., 1987. *Régénération naturelle du pin blanc après coupe à diamètre-limite dans le sud-ouest du Québec*. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Faculté de foresterie et de géodésie. Québec, QC. 69 p.

- Huot, M. et J. Lemieux, 2003. *Croissance et régénération naturelle du pin à la suite de coupes dans des peuplements à pin blanc de l'Outaouais. Résultats sur 15 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 476. 51 p.
- Lane, R.D., 1959. « What is a quality tree? ». Dans : Marquis, R.W. (édit.), *What's known about managing eastern white pine*. U.S.D.A. Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA (États-Unis). Station Paper n° 121. p. 7-11. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/sp/sp_ne121.pdf
- Leak, W.B. et N.I. Lamson, 1999. *Revised white pine stocking guide for managed stands*. U.S.D.A. Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. Newton Square, PA (États-Unis). NATP0199. 2 p. https://www.fs.fed.us/nrs/pubs/jrnl/1999/ne_1999_leak-na-tp-01-99.pdf
- Leak, W.B. et M. Yamasaki, 2013. *Effects of low-density thinning in a declining white pine stand in Maine*. U.S.D.A. Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA (États-Unis). Research Note NRS-170. 6 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RN-170>
- Li, R., A. Weiskittel, A.R. Dick, J.A. Kershaw, Jr. et R.S. Seymour, 2012. *Regional stem taper equations for eleven conifer species in the Acadian region of North America: Development and assessment*. North. J. Appl. For. 29(1): 5-14. <https://doi.org/10.5849/njaf.10-037>
- Littell, R.C., W.W. Stroup et R.J. Freund, 2002. *SAS for Linear Models, 4th Edition*. SAS Institute. Cary, NC (États-Unis). 496 p.
- Livingston, W.H., I. Munck, K. Lombard, J. Weimer, A. Bergdahl, L.S. Kenefic, B. Schultz et R.S. Seymour, 2019. *Field manual for managing eastern white pine health in New England*. University of Maine, Maine Agricultural and Forest Experiment Station, Orono, ME (États-Unis). Miscellaneous Publication n° 764. 20 p. https://www.fs.fed.us/nrs/pubs/jrnl/2019/nrs_2019_livingston_001.pdf
- Logan, K.T., 1950. *Influence of thinning on reproduction beneath a red and white pine stand*. Canadian Forestry Branch, Department of Resources and Development, Division of Forest Research. Silvicultural Leaflet n° 50. 3 p.
- McIntire, C.D., I.A. Munck, M.J. Ducey et H. Asbjornsen, 2018a. *Thinning treatments reduce severity of foliar pathogens in eastern white pine*. For. Ecol. Manage. 423: 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.032>
- McIntire, C.D., I.A. Munck, M.A. Vadeboncoeur, W.H. Livingston et H. Asbjornsen, 2018b. *Impacts of White Pine Needle Damage on seasonal litterfall dynamics and wood growth of eastern white pine (Pinus strobus) in northern New England*. For. Ecol. Manage. 423: 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.034>
- McNab, W.H. et B.A. Ritter, 2000. *The Old Orchard white pine plantation at Biltmore: 100 years later*. J. For. 98(11): 18-23. <https://doi.org/10.1093/jof/98.11.18>
- [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>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2018a. *Plan d'aménagement forestier intégré tactique 2018-2023 applicable aux unités d'aménagement 071-51, 071-52, 072-51, 073-51, 073-52 et 074-51 de la région de l'Outaouais*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion des forêts de l'Outaouais. 159 p. https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/PAFIT-071-51_071-52_072-51_073-51_073-52_074-51.pdf
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2018b. *La brûlure en bandes brunes*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la protection des forêts. Fiche descriptive (Page Web). https://bdl.oqlf.gouv.qc.ca/bdl/gabarit_bdl.asp?id=5050
- Morneault, A., S. McPherson et B. Davidson, 2010. *Status report to the Forestry Research Partnership – Effect of selected intensities of silviculture on growth and yield of overstory and understory white pine*. Ontario Ministry of Natural Resources, Status report to the Forestry Research Partnership, Projet n° 130-209 (6329). 20 p.

- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises — 2012*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la protection des forêts, Service de la gestion des ravageurs forestiers. 51 p. <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/insectes/bilan2012.pdf>
- Nappi, A., 2013. « Chapitre 4 — Objectifs d'aménagement ». Dans : *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef, p. 135-143. https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/135-143_MDPF_Pins.pdf
- [NELMA] Northeastern Lumber Manufacturers Association, 2017. *Standard grading rules for northeastern lumber — Section 3*. 12 p. https://www.nelma.org/wp-content/uploads/grade2017_Section3.pdf
- Nicholson, D.S. et J.S. Ward, 1995. « Fifty-year response of a 135-yr-old white pine stand to partial thinning in Connecticut ». Résumé d'une conférence parue dans : Gottschalk, K.W. et S.L.C. Fosbroke (édit.), *Proceedings of the 10th Central Hardwood Forest Conference*. 5 au 8 mars 1995. Morgantown, WV (États-Unis). p. 549. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne197/gtr_ne197_549.pdf
- [OMNRF] Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, 2015. *Forest management guide to silviculture in the Great Lakes—St. Lawrence and boreal forests of Ontario*. Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry. <https://www.ontario.ca/page/forest-management-great-lakes-and-st-lawrence-landscapes>
- Parker, W.C., 2014. *The relationship of stand structure with canopy transmittance: Simple models and practical methods for managing understory light conditions in eastern white pine (Pinus strobus L.)-dominated forests*. For. Chron. 90(4) : 489-497. <https://doi.org/10.5558/tfc2014-099>
- 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*. Ontario Ministry of Natural Resources, Toronto, ON. 40 p.
- 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>
- Schlaegel, B.E., 1971. *White pine production best at high stocking*. U.S.D.A. Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Saint Paul, MN (États-Unis). Research Note NC-115. 2 p. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/11293>
- Seymour, R.S. et M.L. Hunter, 1999. « Principles of ecological forestry ». Dans : M. L. Hunter (édit.), *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge (Royaume-Uni). p. 22-62.
- Seymour, R.S. et D.M. Smith, 1987. *A new stocking guide formulation applied to eastern white pine*. For. Sci. 33(2): 469-484.
- Smith, D.M. et R.S. Seymour, 1986. « Relationship between pruning and thinning ». Dans : Funk, D.T. (édit.), *Eastern white pine: today and tomorrow*. Symposium Proceedings, 12-14 juin 1985. Durham, NH (États-Unis). U.S.D.A. Forest Service, General Technical Report WO-51. p. 62-66.
- Smith, D.J. et M.E. Woods, 1997. *Red pine and white pine density management diagrams for Ontario*. Government of Ontario, Ministry of Natural Resources, South Central Sciences Section. Technical Report n° 48. 31 p.
- 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.
- Spalding, V.M. et B.E. Fernow, 1899. *The white pine (Pinus strobus Linnaeus)*. U.S.D.A., Division of Forestry. Bulletin n° 22. 179 p.
- Streit, M., 1991. *Response to thinning in a 50-year-old white pine stand*. Ontario Ministry of Natural Resources, FGF Online. p. 1-2.
- Westfall, P.H., R.D. Tobias, R. Dror, Y. Hochberg et R.D. Wolfinger, 2000. *Multiple comparisons and multiple test. Using the SAS System*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis). 397 p. <https://doi.org/10.1002/sim.1168>
- White, L.T., 1953. *Studies in forest pathology: X. Decay of white pine in the Timigami Lake and Ottawa Valley areas*. Can. J. Bot. 31(2): 175-200. <https://doi.org/10.1139/b53-018>

- Whitney, R.D., 1991. *Quality of eastern white pine 10 years after damage by logging*. For. Chron. 67(1) : 23-26. <https://doi.org/10.5558/tfc67023-1>
- Whitney, R.D. et L.G. Brace, 1979. *Internal defect resulting from logging wounds in residual white pine trees*. For. Chron. 55(1): 8-12. <https://doi.org/10.5558/tfc55008-1>
- Wile, B.C., 1955. *Thinning in a white pine stand*. Government of Canada, Department of Northern Affairs and National Resources, Forestry Branch, Forest Research Division. Technical Note n° 5. 3 p. <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=30472>
- Woods, M.E. et R.J. Miller, 1996. *Red pine and white pine site index curves and tables for South Central region*. Ontario Ministry of Natural Resources, South/Central Sciences Section, Science Development and Transfer Branch, Science and Information Resources Division. North Bay, ON. Technical Note 02. 11 p.
- Wyka, S.A., C. Smith, I.A. Munck, B.N. Rock, B.L. Ziniti et K. Broders, 2017. *Emergence of white pine needle damage in the northeastern United States is associated with changes in pathogen pressure in response to climate change*. Glob. Change Biol. 23(1): 394-405. <https://doi.org/10.1111/gcb.13359>

Annexes

Annexe 1. Résultats des analyses statistiques

1.1. Modélisation de la relation hauteur–DHP

Trois modèles ont été testés à partir de données prises sur 251 pins blancs échantillonnés dans les 11 parcelles du dispositif expérimental :

Le modèle utilisé dans Godbout (2016) $Ht = a + bDHP + c(1/DHP)$;

Le modèle logarithmique $Ht = a + bLn(DHP)$;

Le modèle de Chapman-Richards $Ht = 1,3 + a(1 - e^{-bDHP})^c$.

Des variables binaires (booléennes) ont été ajoutées pour tenir compte des 3 niveaux du traitement de même que les effets aléatoires dus aux parcelles, pour lesquelles les données mesurées sur les arbres ne sont pas nécessairement indépendantes (tableau A2.1.1).

La procédure NLMIXED du logiciel SAS (version 9.4) a été utilisée pour tous les modèles afin de comparer ceux-ci sur une base commune en utilisant le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) pour les échantillons de petite taille et 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, car la modélisation est plus simple avec cette procédure. Pour ces modèles, 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 (pour celle de la normalité). L'hypothèse d'homogénéité de la variance a été vérifiée, et aucune pondération ni transformation n'a été appliquée.

Les résultats ont montré que pour les 3 modèles, le traitement EC19 était différent des 2 autres traitements (EC23 et Témoin). Ainsi, la variable booléenne Z prend la valeur 1 pour l'EC19, sinon Z = 0 pour les 2 autres traitements (tableau A1.1.1).

Les résultats ont montré que le modèle de Chapman-Richards (Richards 1959) était légèrement supérieur au modèle logarithmique, alors que le premier modèle était le moins performant (tableau A1.1.1). Le modèle logarithmique a été choisi pour les calculs, car il ne fait pas intervenir une hauteur limite, contrairement au modèle de Chapman-Richards. D'ailleurs, la limite de hauteur de ce dernier modèle pouvait sous-estimer la hauteur des plus gros pins (figure A1.1.2). Le modèle retenu a donc été le suivant :

$$H = -12,646 - 2,066 \times Z + 11,539 \times \ln(DHP)$$

où Z = 1 pour le traitement EC19 et

Z = 0 pour les traitements EC23 et Témoin.

Tableau A1.1.1 Valeurs des coefficients des modèles, du critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) et du carré moyen des résultats (CMR). L'erreur associée aux valeurs du CMR est indiquée entre parenthèses.

Modèle						AICc	CMR
Modèle 1. $Ht_{ijk} = a + dZ_i + (ub_j + b)DHP_{ijk} + c(1/DHP_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}$							
Paramètre	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeurs de t	Pr> t	1 119,5	4,4452 (0,000521)
<i>a</i>	29,499	1,490	10	18,90	< 0,0001		
<i>d</i>	-2,003	0,638	10	-3,14	0,0105		
<i>b</i>	0,137	0,023	10	5,93	0,0001		
<i>c</i>	-200,04	21,185	10	-9,44	< 0,0001		
Modèle 2. $Ht_{ijk} = a + dZ_i + (ub_j + b) \ln(DHP_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}$							
Paramètre	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	t	Pr> t	1 111,0	4,3478 (0,0686)
<i>a</i>	-12,646	1,248	10	10,13	< 0,0001		
<i>d</i>	-2,066	0,710	10	-2,91	0,0155		
<i>b</i>	11,539	0,342	10	33,72	< 0,0001		
Modèle 3. $Ht_{ijk} = 1,3 + (ua_j + a)(1 - e^{-(b + dZ_i)DHP_{ijk}})^c + \varepsilon_{ijk}$							
Paramètre	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	t	Pr> t	1 097,2	4,0337 (1,8828)
<i>a</i>	35,504	0,989	10	35,89	< 0,0001		
<i>b</i>	0,043	0,006	10	7,76	< 0,0001		
<i>d</i>	-0,008	0,002	10	-3,51	0,0056		
<i>c</i>	1,020	0,116	10	8,78	< 0,0001		

où Ht = hauteur totale (m),

DHP = diamètre (cm),

Z = variable indicatrice pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

a, b, c, d = coefficients,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua et ub = effets aléatoires dus aux parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

Figure A1.1.1 Hauteur totale des pins blancs en fonction du DHP, 25 ans après la coupe, selon les traitements, et courbes du modèle retenu (modèle logarithmique).

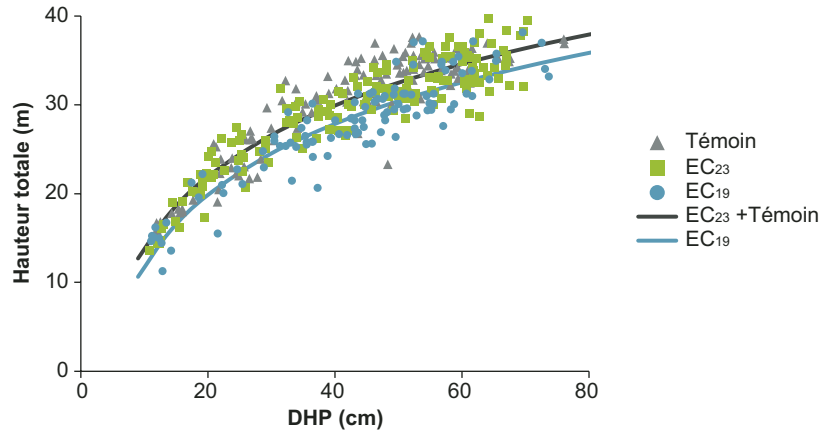
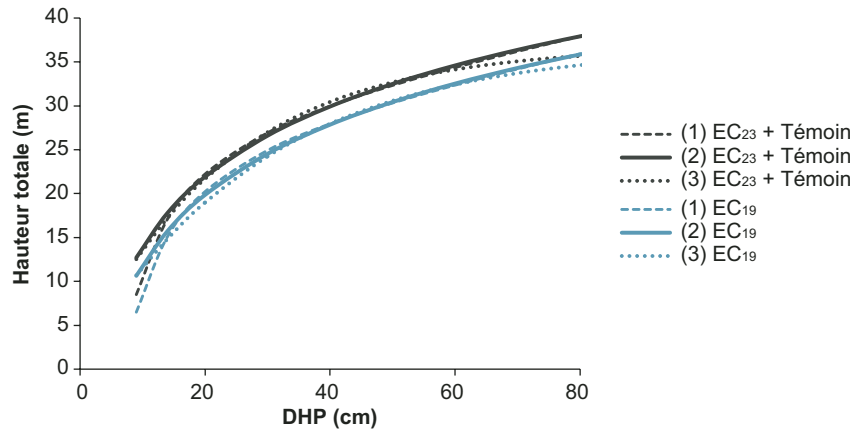


Figure A1.1.2 Courbes des 3 modèles pour estimer après 25 ans la hauteur totale des pins blancs en fonction du DHP. Dans la légende, les chiffres entre parenthèses réfèrent au numéro du modèle de régression.



1.2. Estimation des paramètres du modèle polynomial de l'accroissement en diamètre du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements.

Modèle utilisé : $AccDHP_{ijk} = a + dZ1_i + eZ2_i + bDHP_{ijk} + cDHP_{ijk}^2 + ub_i + \varepsilon_{ijk}$

où $AccDHP$ = accroissement du DHP en 25 ans (cm),

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ub = effet aléatoire dû aux parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

Les pentes générales des courbes pour les 3 traitements se sont avérées parallèles (non significativement différentes).

Tableau A1.2.1 Estimation des paramètres du modèle polynomial.

Effet	Traitement	Coefficient	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité
Ordonnée à l'origine		a	-5,8244	0,429	10	-13,59	< 0,0001
DHP		b	0,4965	0,028	10	17,65	< 0,0001
DHP * DHP		c	-0,0037	0,0004	10	-8,24	< 0,0001
Traitement	EC19 ($Z1$)	d	4,3711	0,222	10	19,72	< 0,0001
Traitement	EC23 ($Z2$)	e	2,0273	0,189	10	10,74	< 0,0001
Traitement	Témoin		0				

Tableau A1.2.2 Tests de comparaisons multiples entre les traitements.

Comparaisons	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité	Probabilité ajustée
EC19 vs Témoin	4,371	0,222	10	19,72	< 0,0001	< 0,0001
EC23 vs Témoin	2,027	0,189	10	10,74	< 0,0001	< 0,0001
EC19 vs EC23	2,344	0,212	10	11,06	< 0,0001	< 0,0001

Tableau A1.2.3 Calcul du DHP initial correspondant à la valeur maximale d'accroissement en diamètre prédit par le modèle polynomial pour chacun des traitements.

Équation $AccDHP = f(x) = a + bx + cx^2 + dZ1 + eZ2$ où $x = DHP$

Traitement	Dérivée	$f'(x) = 0$	x (cm)
EC19 ($Z1 = 1, Z2 = 0$)	$f'(x) = 2cx + b$	$x = -b/2c$	67
EC23 ($Z1 = 0, Z2 = 1$)	$f'(x) = 2cx + b$	$x = -b/2c$	67
Témoin ($Z1 = 0, Z2 = 0$)	$f'(x) = 2cx + b$	$x = -b/2c$	67

1.3. Estimation des paramètres du modèle polynomial de l'accroissement en surface terrière du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements.

$$\text{Modèle utilisé : } AccST_{ijk} = a + d Z1_i + e Z2_i + b DHP + c DHP^2_{ijk} + ub_i + \varepsilon_{ijk}$$

où $AccST$ = accroissement en surface terrière par arbre en 25 ans (cm),

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ub = effet aléatoire dû aux parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

Les pentes générales des courbes pour les 3 traitements se sont avérées parallèles (non significativement différentes).

Tableau A1.3.1. Estimation des paramètres du modèle polynomial.

Effet	Traitement	Coefficient	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité
Ordonnée à l'origine		a	-1,4253	0,3041	9	-4,69	< 0,0011
DHP		b	0,0538	0,0198	9	2,71	< 0,0238
DHP×DHP		c	0,0036	0,0003	9	12,44	< 0,0001
Traitement	EC19 ($Z1$)	d	1,4992	0,0980	9	15,30	< 0,0001
Traitement	EC23 ($Z2$)	e	0,6285	0,0808	9	7,77	< 0,0001
Traitement	Témoin		0				

Tableau A1.3.2. Tests de comparaisons multiples entre les traitements.

Comparaisons	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité	Probabilité ajustée
EC19 vs Témoin	1,499	0,098	9	15,30	< 0,0001	< 0,0001
EC23 vs Témoin	0,628	0,081	9	7,77	< 0,0001	< 0,0001
EC19 vs EC23	0,871	0,088	9	9,93	< 0,0001	< 0,0001

1.4. Estimation des paramètres du modèle polynomial du taux de production de la composante de l'accroissement des survivants des pins blancs, pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements.

$$\text{Modèle utilisé : } \text{LogTauxAccSt}_{ijk} = a + fZ1_i + gZ2_i + bDHP_{ijk} + cDHP_{ijk}^2 + dDHP_{ijk}Z1_i + eDHP_{ijk}Z2_i + ua_i + \varepsilon_{ijk}$$

où LogTauxAccSt = logarithme du taux de production par accroissement en surface terrière après 25 ans,

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua = effet aléatoire dû aux parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

Les pentes générales des courbes pour les 3 traitements se sont avérées significativement différentes (non parallèles).

Tableau A1.4.1 Estimation des paramètres du modèle polynomial.

Effet	Traitement	Coefficient	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité
Ordonnée à l'origine		a	-2,960281	0,115	361	-25,64	< 0,001
DHP		b	0,091425	0,006	1954	14,38	< 0,001
DHP×DHP		c	-0,000966	0,00009	2084	-10,86	< 0,001
Traitement	EC19 (Z1)	f	1,749590	0,119	80	14,67	< 0,001
Traitement	EC23 (Z2)	g	0,970967	0,094	61	10,29	< 0,001
Traitement	Témoïn		0				
DHP×Traitement	EC19 (DHP×Z1)	d	-0,030008	0,004	803	-8,33	< 0,001
DHP×Traitement	EC23 (DHP×Z2)	e	-0,017218	0,003	1214	-6,46	< 0,001
DHP×Traitement	Témoïn		0				

Tableau A1.4.2. Tests de comparaisons multiples entre les traitements par valeur de DHP initial fixé (différence de moyennes du logarithme du taux de production par accroissement des survivants).

Traitement 1	Traitement 2	DHP initial (cm)*	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité	Probabilité ajustée
EC19	EC23	15	0,587	0,073	17,3	8,09	< 0,0001	< 0,0001
EC19	Témoin	15	1,299	0,077	20,6	16,92	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	15	0,713	0,064	16,2	11,05	< 0,0001	< 0,0001
EC19	EC23	19	0,536	0,065	11,9	8,22	< 0,0001	< 0,0001
EC19	Témoin	19	1,179	0,068	13,9	17,28	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	19	0,644	0,059	11,4	10,98	< 0,0001	< 0,0001
EC19	EC23	27	0,433	0,058	7,9	7,53	< 0,0001	0,0005
EC19	Témoin	27	0,939	0,059	8,4	16,02	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	27	0,506	0,052	7,1	9,79	< 0,0001	< 0,0001
EC19	EC23	29	0,407	0,057	8,0	7,07	0,0001	0,0004
EC19	Témoin	29	0,877	0,058	8,3	15,07	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	29	0,471	0,051	6,8	9,20	< 0,0001	< 0,0001
EC19	EC23	35	0,331	0,062	10,8	5,34	0,0003	0,0010
EC19	Témoin	35	0,699	0,062	10,8	11,23	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	35	0,368	0,053	7,8	6,95	0,0001	0,0002
EC19	EC23	43	0,229	0,076	23,7	2,99	0,0064	0,0180
EC19	Témoin	43	0,459	0,077	23,4	5,94	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	43	0,231	0,062	13,8	3,71	0,0024	0,0038

* Les valeurs petites (15 et 19 cm), moyennes (29 et 27 cm) et grandes (35 et 43 cm) correspondent approximativement au 10^e percentile, au 1^{er} quartile, à la moyenne, à la médiane, au 3^e quartile et au 90^e percentile de la distribution des valeurs de DHP initial.

Tableau A1.4.3 Calcul du DHP initial correspondant à la valeur maximale du taux de production par accroissement des survivants prédit par le modèle polynomial pour chacun des traitements.

Équation $AccSt = f(x) = a + bx + cx^2 + dxZ1 + exZ2 + fZ1 + gZ2$ où $x = DHP$.

Traitement	Dérivée	f'(x) = 0	x (cm)
EC19 (Z1 = 1, Z2 = 0)	$f'(x) = 2cx + b + d$	$x = -(b + d)/2c$	32
EC23 (Z1 = 0, Z2 = 1)	$f'(x) = 2cx + b + e$	$x = -(b + e)/2c$	38
Témoin (Z1 = 0, Z2 = 0)	$f'(x) = 2cx + d$	$x = -b/2c$	47

1.5. Estimation des paramètres du modèle polynomial du taux de mortalité en surface terrière du pin blanc pour la période de 25 ans suivant la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements.

Modèle utilisé (transformation logit) :

$$\text{Log} \frac{\text{TauxMort}_{ijk}}{(1-\text{TauxMort}_{ijk})} = a + f Z1_i + g Z2_i + b \text{DHP}_{ijk} + c \text{DHP}_{ijk}^2 + ua_j + \varepsilon_{jk(i)}$$

où TauxMort = taux de mortalité en surface terrière après 25 ans,

DHP = diamètre initial (cm),

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie,

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua = effet aléatoire dû aux parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

Les pentes générales des courbes pour les 3 traitements se sont avérées parallèles (non significativement différentes).

Tableau A1.5.1 Estimation des paramètres du modèle polynomial de la transformation logit.

Effet	Traitement	Coefficient	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité
Ordonnée à l'origine		a	6,401	0,425	43,8	15,06	<0,0001
DHP		b	-0,435	0,024	2 898,2	-18,01	<0,0001
DHP ²		c	0,005	0,0004	2 898,8	12,92	<0,0001
Traitement	EC19 ($Z1$)	f	-1,606	0,441	9,2	-3,64	0,0052
Traitement	EC23 ($Z2$)	g	-0,972	0,384	7,5	-2,53	0,0373
Traitement	Témoin		0				

Tableau A1.5.2 Tests de comparaisons multiples entre les traitements.

Comparaison	Valeur estimée*	Erreur type	Rapport de cote (odd ratio)	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité	Probabilité ajustée
EC19 vs Témoin	1,606	0,441	5,0 (Témoin / EC19)	9,2	3,64	0,005	0,015
EC23 vs Témoin	0,972	0,385	2,6 (Témoin / EC23)	7,5	2,53	0,037	0,079
EC19 vs EC23	0,634	0,441	1,9 (EC23 / EC19)	9,2	1,44	0,183	0,365

* Différence entre les moyennes des traitements de la transformation logit du taux de mortalité.

1.6. Estimation des paramètres du modèle polynomial du taux de production interne du pin blanc pour la période de 25 ans après la coupe en fonction du DHP après la coupe, et tests de comparaisons multiples entre les traitements.

Modèle utilisé :

$$\begin{aligned} \text{TauxProd}_{ijk} = & d + h Z1_i + l Z2_i + c \text{DHP}_{ijk} + b \text{DHP}_{ijk}^2 + g \text{DHP}_{ijk} Z1_i + k \text{DHP}_{ijk} Z2_i \\ & + f \text{DHP}_{ijk}^2 Z1_i + j \text{DHP}_{ijk}^2 Z2_i + ua_i + \varepsilon_{ijk} \end{aligned}$$

où TauxProd = taux de production en surface terrière après 25 ans;

DHP = diamètre initial (cm);

$Z1$ et $Z2$ = variables indicatrices pour tenir compte des 3 niveaux d'éclaircie;

i = traitement,

j = parcelle,

k = arbre,

ua = effet aléatoire dû aux parcelles et

ε_{ijk} = terme d'erreur.

Les pentes générales des courbes pour les 3 traitements se sont avérées significativement différentes (non parallèles).

Tableau A1.6.1 Estimation des paramètres du modèle polynomial.

Effet	Traitement	Coefficient	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité
Ordonnée à l'origine		d	-1,943	0,123	83,6	-15,77	< 0,0001
DHP		c	0,109	0,008	118,0	13,76	< 0,0001
DHP*DHP		b	-0,001	0,0001	119,0	-9,68	< 0,0001
Traitement	EC19 ($Z1$)	h	0,681	0,246	113,0	2,76	0,007
Traitement	EC23 ($Z2$)	l	0,135	0,176	84,8	0,77	0,444
Traitement	Témoin		0				
DHP * Traitement	EC19 (DHP × $Z1$)	g	0,013	0,017	120,0	0,76	0,449
DHP * Traitement	EC23 (DHP × $Z2$)	k	0,020	0,011	118,0	1,76	0,081
DHP * Traitement	Témoin		0				
DHP * DHP * Traitement	EC19 (DHP ² × $Z1$)	f	-0,00049	0,0003	120,0	-1,77	0,079
DHP * DHP * Traitement	EC23 (DHP ² × $Z2$)	j	-0,00046	0,0002	118,0	-2,44	0,016
DHP * DHP * Traitement	Témoin						

Tableau A1.6.2 Tests de comparaisons multiples entre les traitements, par valeur de DHP initial fixé.

Traitement 1	Traitement 2	DHP initial (cm)*	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Probabilité	Probabilité ajustée
EC19	EC23	11	0,458	0,124	24,5	3,70	0,001	0,004
EC19	Témoin	11	0,762	0,125	25,0	6,11	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	11	0,303	0,099	14,9	3,06	0,008	0,017
EC19	EC23	15	0,424	0,105	13,0	4,06	0,001	0,004
EC19	Témoin	15	0,761	0,105	13,3	7,23	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	15	0,337	0,089	9,6	3,80	0,004	0,006
EC19	EC23	23	0,353	0,098	10,1	3,61	0,005	0,014
EC19	Témoin	23	0,714	0,098	10,1	7,30	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	23	0,360	0,086	8,5	4,19	0,003	0,007
EC19	EC23	26	0,328	0,100	10,9	3,29	0,007	0,020
EC19	Témoin	26	0,683	0,099	10,7	6,88	< 0,0001	< 0,0001
EC23	Témoin	26	0,355	0,087	9,0	4,06	0,003	0,006
EC19	EC23	35	0,238	0,103	12,7	2,31	0,038	0,093
EC19	Témoin	35	0,524	0,103	12,5	5,09	0,0002	0,001
EC23	Témoin	35	0,286	0,090	10,2	3,17	0,010	0,022
EC19	EC23	43	0,156	0,114	18,2	1,37	0,187	0,380
EC19	Témoin	43	0,319	0,113	18,0	2,81	0,012	0,033
EC23	Témoin	43	0,163	0,094	12,1	1,73	0,110	0,231

* Les valeurs petites (11 et 15 cm), moyennes (26 et 23 cm) et grandes (35 et 43 cm) correspondent approximativement au 10^e percentile, au 1^{er} quartile, à la moyenne, à la médiane, au 3^e quartile et au 90^e percentile de la distribution des valeurs de DHP initial.

Tableau A1.6.3. Calcul du DHP initial correspondant à la valeur maximale du taux de production interne prédit par le modèle polynomial pour chacun des traitements.

$$\text{TauxProd} = f(x) = d + hZ1 + lZ2 + cx + bx^2 + gxZ1 + kxZ^2 + fx^2Z1 + jx^2Z2 \text{ où } x = \text{DHP}$$

Traitement	Dérivée	f'(x) = 0	x (cm)
EC19 (Z1 = 1, Z2 = 0)	$f'(x) = 2x(b + f) + c + g$	$x = -(c + g)/2(b + f)$	35
EC23 (Z1 = 0, Z2 = 1)	$f'(x) = 2x(b + j) + c + k$	$x = -(c + k)/2(b + j)$	38
Témoin (Z1 = 0, Z2 = 0)	$f'(x) = 2bx + c$	$x = -c/2b$	44

Annexe 2. Méthode de calcul pour estimer la production du pin blanc sur une période de 25 ans suivant la coupe pour chacun des traitements, selon les classes de DHP basées sur les dimensions minimales pour la production de billes de sciage.

La méthode de calcul est basée sur les coefficients des régressions linéaires entre la surface terrière après la coupe (ST) et la production interne (accroissement des survivants soustrait de la mortalité) et le recrutement. Elle permet ultimement de calculer :

- la production nette (et la surface terrière après 25 ans) par classe de DHP ou pour un groupe de classes (p. ex. DHP \geq 22,1 cm);
- le transfert des pins d'une classe de DHP à une autre (transfert de classe).

Tableau A2.1. Coefficients des régressions linéaires selon le traitement, la composante de la production et la classe de DHP.

Traitement	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9
	Production interne				Recrutement				
	DHP : 9-22 cm	DHP : 22-27 cm	DHP : 27-42 cm	DHP : \geq 42 cm	DHP : 9-22 cm	DHP : 22-27 cm	DHP : 27-42 cm	DHP : \geq 42 cm	DHP : \geq 42 cm
					En provenance de la classe 9-22 cm	En provenance de la classe 9-22 cm	En provenance de la classe 22-27 cm	En provenance de la classe 27-24 cm	En provenance de la classe 27-24 cm
EC19	0,46	0,72	0,77	0,61	0	0,42	0,57	1,71	1,26
EC23	-0,17	0,43	0,57	0,35	0	0,36	0,07	1,25	1,05
Témoin PE-	-0,77	0,04	0,26	0,29	0	0,07	0,02	0,72	0,74
Témoin PE+	-0,25	0,15	0,35	0,29	0	0,28	0,04	0,79	0,59

2.1 Données nécessaires au calcul

La surface terrière après la coupe (éclaircie) ou initiale (témoin) des pins blancs pour chacune des classes de DHP suivantes :

- 9-22 cm : DHP de 9,1 à 22,0 cm (aucune bille de sciage);
- 22-27 cm : DHP de 22,1 à 27,1 cm (potentiel de billes de sciage de qualité I);
- 27-42 cm : DHP de 27,1 à 42,0 cm (potentiel de billes de sciage de qualité H);
- \geq 42 cm : DHP de 42,1 cm et plus (potentiel de billes de sciage de qualité G).

2.2 Calcul de la production interne, du recrutement et du transfert de classe

2.2.1. Calcul de la production interne

Le coefficient de la production interne est multiplié par la surface terrière après la coupe (selon la classe de DHP et le traitement).

2.2.2. Calcul du recrutement

Le ou les coefficients du recrutement sont multipliés par la surface terrière après la coupe (selon la classe de DHP et le traitement). Comme le recrutement se fait à partir de la classe ou des classes de DHP plus petit, c'est la surface terrière de ces dernières qui doit être utilisée. Pour les classes de DHP de 27-42 cm, le recrutement provient à la fois de la classe de DHP de 9-22 cm et de celle de 22-27 cm. Voici le détail du calcul pour chacune des classes de DHP :

- Recrutement dans la classe de 9-22 cm : Aucun;
- Recrutement dans la classe de 22-27 cm : coefficient #6 × ST 9-22 cm;
- Recrutement dans la classe de 27-42 cm : (coefficient #7 × ST 9-22 cm) + (coefficient #8 × ST 22-27 cm);
- Recrutement dans la classe de ≥ 42 cm : coefficient #9 × ST 27-42 cm.

Pour les groupes de classes de DHP, le recrutement se calcule ainsi :

- Recrutement pour le groupe de classe ≥ 9 cm : Aucun;
- Recrutement pour le groupe de classes ≥ 22 cm :
(coefficient #6 × ST 9-22 cm) + (coefficient #7 × ST 9-22 cm);
- Recrutement pour le groupe de classe ≥ 27 cm : coefficient #8 × ST 22-27 cm.

2.2.3. Calcul du transfert de classe

Le transfert de classe est utilisé uniquement dans le calcul d'une classe de DHP unique, et non pour les groupes de classes. Il est calculé à partir des valeurs du recrutement calculées précédemment, puisque le transfert d'une classe donnée de DHP devient le recrutement pour les classes de plus grands DHP. Voici le détail du calcul du transfert pour chacune des classes de DHP :

- 9-22 cm : (coefficient #6 × ST 9-22 cm) + (coefficient #7 × ST 9-22 cm);
- 22-27 cm : coefficient #8 × ST 22-27 cm;
- 27-42 cm : coefficient #9 × ST 27-42 cm;
- ≥ 42 cm : aucun.

2.3 Méthodes de calcul

2.3.1. Pour une seule classe de DHP

- Production nette = Production interne + Recrutement – Transfert de classe;
- Surface terrière après 25 ans = ST après la coupe + Production nette.

2.3.2. Pour un groupe de classes de DHP (p. ex. DHP ≥ 22,1 cm)

- Production nette = Production interne de chacune des classes de DHP concernées
+ Recrutement en provenance des classes de plus petits DHP;
- Surface terrière après 25 ans = ST après la coupe de chacune des classes de DHP concernées
+ Production nette.

2.4 Exemples de calcul pour le traitement EC23

Données de base :

- Surface terrière après la coupe du traitement : $23 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Proportion de la surface terrière en pin blanc après la coupe : 80 %;
- Répartition de la surface terrière après la coupe des pins blancs selon la classe de DHP : 9-22 cm : 15 %; DHP 22-27 cm : 10 %; DHP 27-42 cm : 40 %; DHP ≥ 42 cm : 35 %.

Après calcul, les ST suivantes sont obtenues: DHP 9-22 cm : $2,76 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; DHP 22-27 cm : $1,84 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; DHP 27-42 cm : $7,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; DHP ≥ 42 cm : $6,44 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.

2.4.1. Pour la classe de DHP de 27-42 cm :

- Production interne : $0,57 \times 7,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} = 4,20 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Recrutement : $(0,07 \times 2,76 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) + (1,25 \times 1,84 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) = 2,49 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Transfert : $1,05 \times 7,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} = 7,73 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Production nette : $4,20 + 2,49 + 7,73 = -1,04 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Surface terrière après 25 ans: $7,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} + (-1,04 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) = 6,32 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.

2.4.2 Pour le groupe de DHP ≥ 22 cm

- Surface terrière après la coupe : $1,84 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} + 7,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} + 6,44 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} = 15,64 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Production interne : $(0,43 \times 1,84 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) + (0,57 \times 7,36 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) + (0,35 \times 6,44 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) = 7,24 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Recrutement : $(0,36 \times 2,76 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) + (0,07 \times 2,76 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}) = 1,18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Production nette : $7,24 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} + 1,18 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} = 8,43 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$;
- Surface terrière après 25 ans: $15,64 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} + 8,43 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} = 24,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Tableau A2.2. Surface terrière et proportion des pins blancs après la coupe par classe de DHP et par parcelle (données observées).

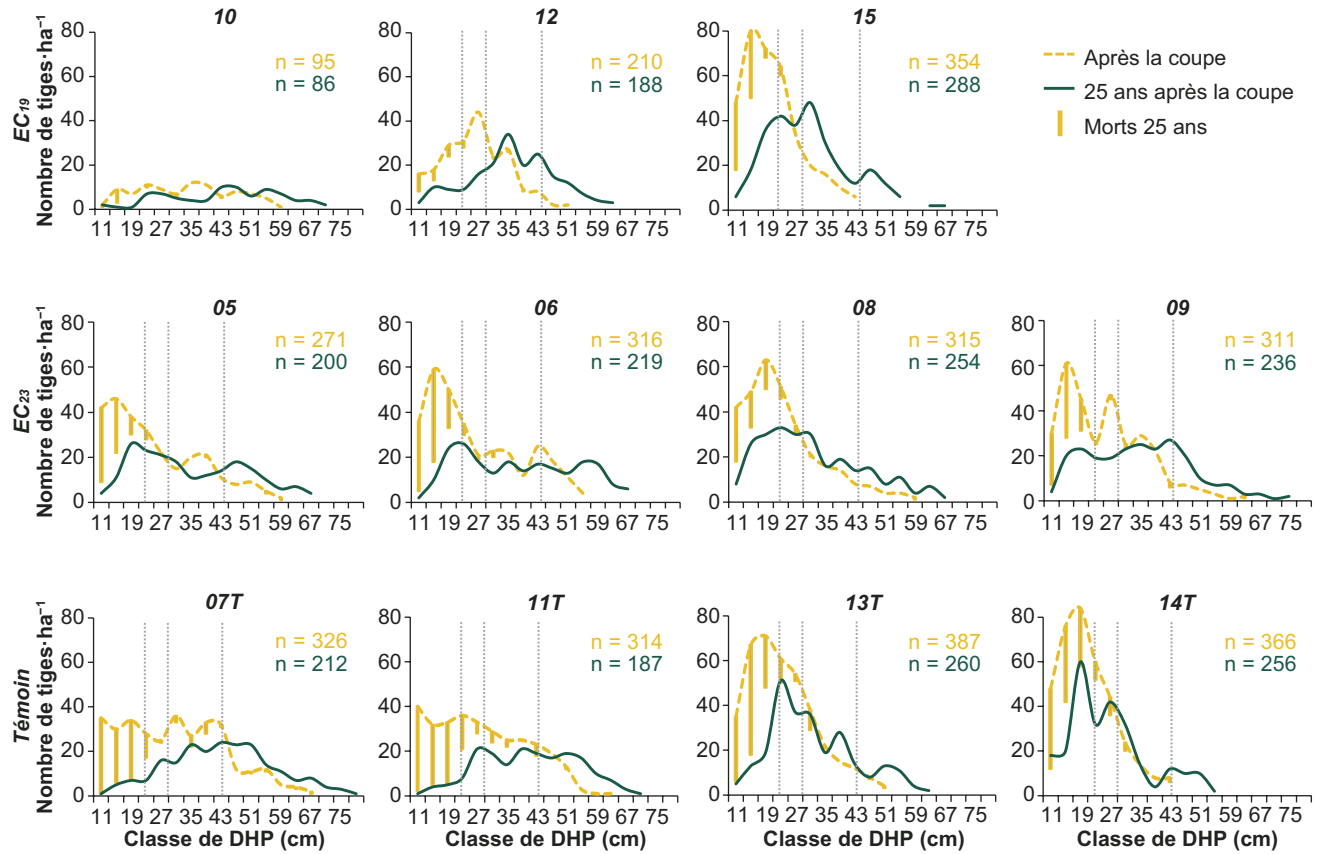
Traitement	Parcelle	Surface terrière après la coupe ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$)					Proportion (%)				
		DHP : 9-22cm	DHP : 22-27cm	DHP : 27-42cm	DHP : ≥ 42 cm	Total	DHP : 9-22cm	DHP : 22-27cm	DHP : 27-42cm	DHP : ≥ 42 cm	Total
EC19	10	0,5	0,5	3,6	4,8	9,4	6	6	38	51	100
	12	1,6	2,2	7,0	1,9	12,6	12	17	55	15	100
	15	4,5	3,1	5,4	1,4	14,4	31	21	38	10	100
	Moyenne	2,2	1,9	5,3	2,7	12,2	17	15	44	25	100
EC23	05	2,8	1,5	6,6	6,0	16,9	17	9	39	35	100
	06	3,3	1,7	6,1	9,5	20,6	16	8	29	46	100
	08	3,6	2,7	5,8	4,4	16,5	22	17	35	27	100
	09	3,1	2,0	9,2	4,5	18,8	17	11	49	24	100
	Moyenne	3,2	2,0	6,9	6,1	18,2	18	11	38	33	100
Témoïn	07	2,1	1,6	11,3	14,0	29,0	7	5	39	48	100
	11T	2,3	1,9	9,1	10,5	23,9	10	8	38	44	100
	13T	4,3	3,5	8,5	3,8	20,1	21	17	42	19	100
	14T	4,7	3,1	5,4	1,2	14,4	33	21	38	8	100
	Moyenne	3,4	2,5	8,6	7,4	21,8	18	13	39	30	100
Moyenne générale		3,0	2,2	7,1	5,6	17,9	17	13	40	30	100

Tableau A2.3. Surface terrière et production des pins blancs par classe de DHP et par parcelle (données observées).

Classe de DHP	Traitement	Parcelle	Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)			Production en 25 ans (m ² ·ha ⁻¹)				
			Avant la coupe	Après la coupe	25 ans après la coupe	Mort	ACC SURV*	REC*	Transfert aux classes supérieures	Production nette
9,1-22,0 cm	EC19	10	0,7	0,5	0,1	0,1	0,3	0,0	0,6	-0,5
		12	2,0	1,6	0,5	0,3	1,2	0,0	1,9	-1,1
		15	5,7	4,5	2,2	0,9	2,9	0,0	4,4	-2,3
	EC23	05	3,5	2,8	1,3	1,0	0,8	0,0	1,4	-1,5
		06	4,1	3,3	1,1	1,6	0,6	0,0	1,3	-2,2
		08	4,4	3,6	1,8	0,9	1,4	0,0	2,4	-1,8
		09	3,8	3,1	1,3	1,2	0,8	0,0	1,4	-1,8
	Témoin	07T	2,1	—	0,4	1,7	0,1	0,0	0,2	-1,8
		11T	2,3	—	0,3	2,0	0,1	0,0	0,2	-2,1
		13T	4,3	—	1,3	1,9	0,6	0,0	1,6	-2,9
		14T	4,7	—	2,6	1,8	0,8	0,1	1,2	-2,1
	22,1-27,0 cm	EC19	10	0,7	0,5	0,5	0,0	0,3	0,4	0,7
12			2,7	2,2	0,6	0,1	1,7	0,6	3,8	-1,6
15			3,8	3,1	1,9	0,2	2,4	1,9	5,3	-1,2
EC23		05	1,8	1,5	1,4	0,1	0,8	1,1	1,9	-0,2
		06	2,4	1,7	1,4	0,3	0,9	1,2	2,1	-0,3
		08	3,5	2,7	2,1	0,3	1,4	1,5	3,2	-0,6
		09	2,5	2,0	1,2	0,1	1,2	1,0	2,9	-0,8
Témoin		07T	1,6	—	0,6	0,3	0,4	0,2	1,3	-1,0
		11T	1,9	—	0,8	0,3	0,4	0,1	1,3	-1,1
		13T	3,5	—	2,7	0,4	1,0	1,4	2,9	-0,8
		14T	3,1	—	2,2	0,5	0,8	1,1	2,3	-0,9
27,1-42,0 cm		EC19	10	6,0	3,6	1,8	0,1	2,8	0,9	5,4
	12		8,9	7,0	9,2	0,3	5,5	5,1	8,1	2,2
	15		6,7	5,4	10,6	0,0	4,5	7,7	7,0	5,2
	EC23	05	7,9	6,6	5,1	0,2	3,7	2,0	7,0	-1,5
		06	8,1	6,1	5,5	0,2	3,5	2,3	6,1	-0,6
		08	7,6	5,8	7,6	0,1	3,8	4,1	6,0	1,8
		09	11,1	9,2	8,2	0,2	5,6	3,3	9,6	-1,0
	Témoin	07T	11,3	—	6,7	1,4	4,3	1,3	8,8	-4,6
		11T	9,1	—	6,7	1,0	3,4	1,4	6,3	-2,4
		13T	8,5	—	9,9	0,9	3,7	3,1	4,5	1,4
		14T	5,4	—	6,0	0,4	2,6	2,5	4,1	0,6
	≥ 42,1 cm	EC19	10	5,6	4,8	13,2	0,1	3,1	5,4	—
12			2,6	1,9	11,0	0	1,0	8,1	—	9,2
15			2,4	1,4	9,2	0	0,8	7,0	—	7,8
EC23		05	8,9	6,0	15,1	0,5	2,5	7,1	—	9,1
		06	10,7	9,5	20,6	0	5,0	6,1	—	11,1
		08	6,8	4,4	12,3	0,3	2,1	6,0	—	7,9
		09	6,3	4,5	15,4	0,6	1,9	9,6	—	10,9
Témoin		07T	14,0	—	26,7	1,3	5,1	8,8	—	12,6
		11T	10,5	—	20,0	0,8	4,0	6,3	—	9,4
		13T	3,8	—	9,4	0,4	1,5	4,5	—	5,6
		14T	1,2	—	5,3	0,3	0,4	4,1	—	4,2

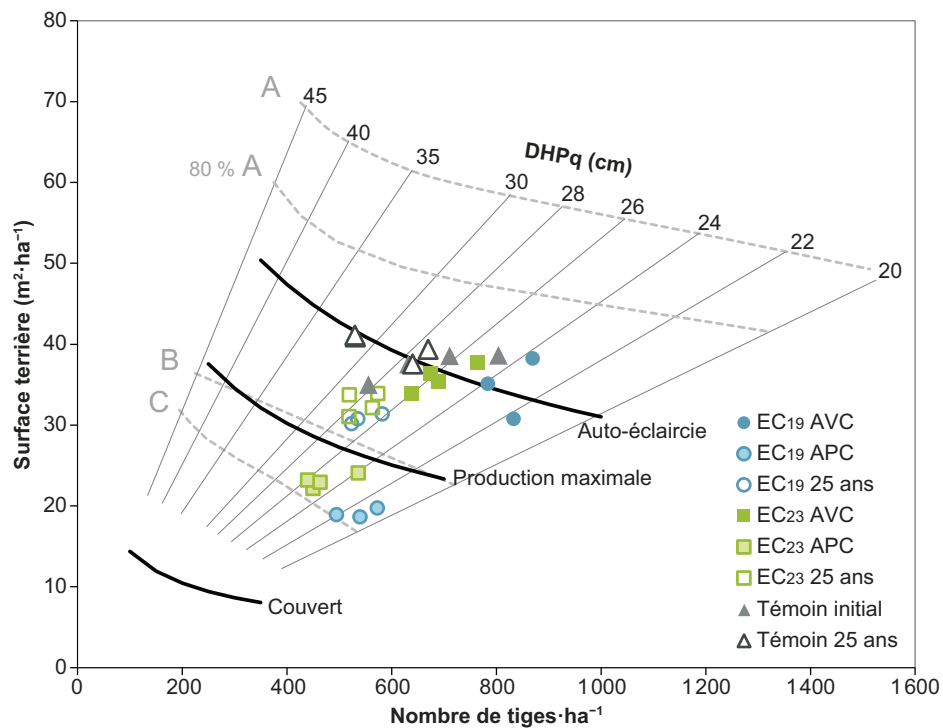
* ACC SURV : production par accroissement des survivants; REC : recrutement.

Annexe 3. Structure diamétrale du pin blanc après la coupe et 25 ans après la coupe, et mortalité pour la période de 25 ans après la coupe, par classe de DHP, pour chacune des parcelles. Le chiffre en haut et au centre de chacun des graphiques indique le numéro de la parcelle. Les 3 lignes pointillées verticales indiquent, de gauche à droite, les DHP minimaux des classes de qualité I, H et G. n = nombre de tiges·ha⁻¹ de pin blanc.



Annexe 4. Positionnement des parcelles sur un diagramme de densité regroupant les seuils de Leak et Lamson (1999; lignes pointillées grises) et ceux de Smith et Woods (1997; lignes pleines et noires). AVC = avant la coupe; APC = après la coupe.

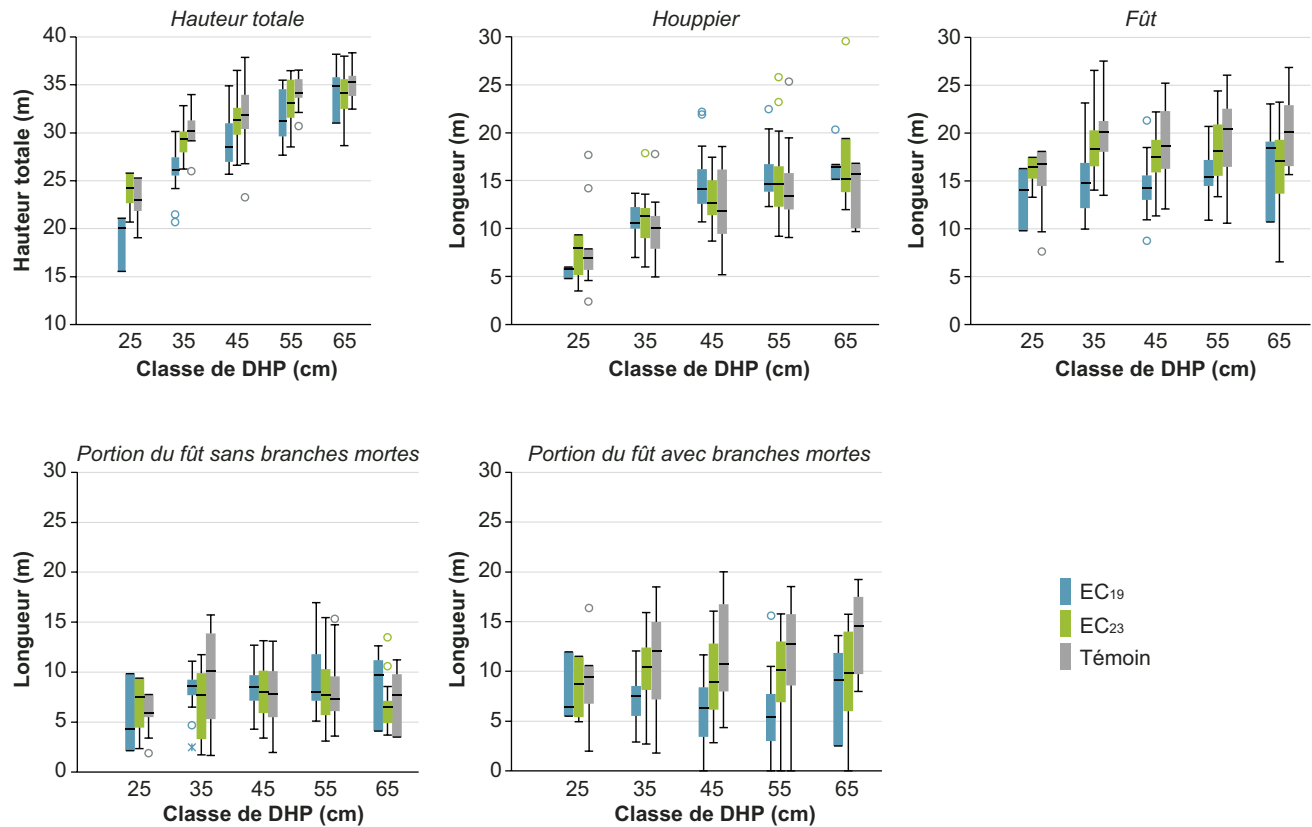
Voir Godbout (2016) pour des explications et une discussion des diagrammes.



Annexe 5. Diagramme en boîte à moustaches de la hauteur totale ainsi que de la longueur du houppier, du fût, du fût sans branches et du fût avec branches mortes des pins blancs en fonction du DHP et des traitements, 25 ans après la coupe : a) valeurs absolues; b) valeurs relatives.

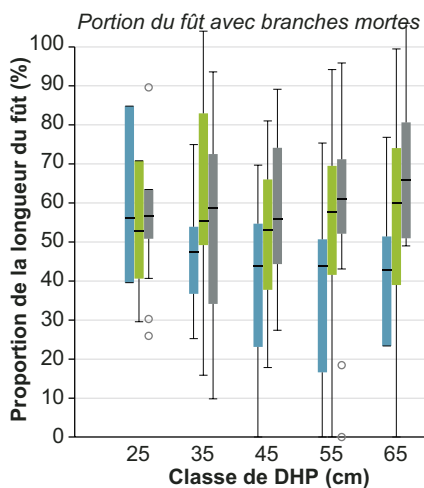
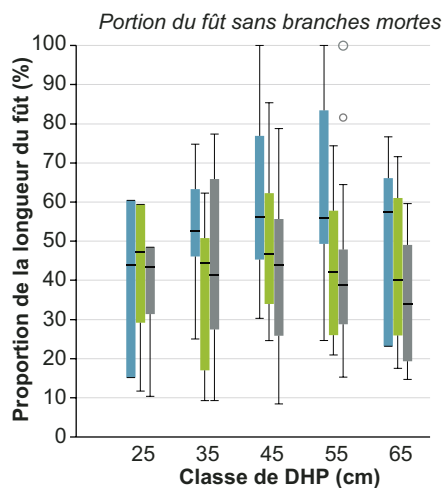
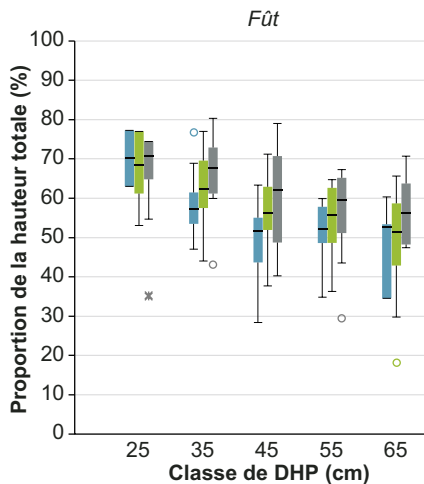
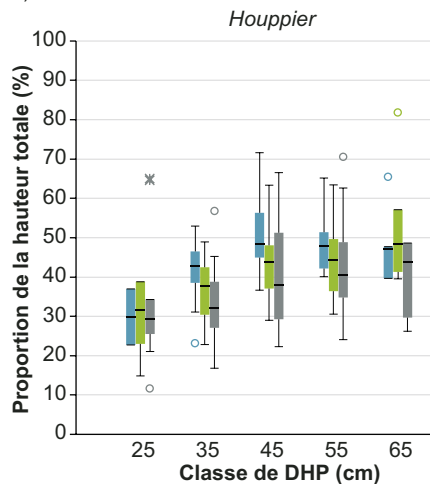
La ligne horizontale dans la boîte représente la médiane, les extrémités de la boîte indiquent les valeurs du 1^{er} et du 3^e quartile, et l'extrémité des moustaches indique les valeurs minimales et maximales observées comprises dans l'intervalle correspondant à 1,5 fois la longueur de la boîte. Les valeurs extrêmes sont représentées par des cercles (de 1,5 à 3 fois la longueur de la boîte) ou des astérisques (> 3 fois la longueur de la boîte).

a) Valeur absolue

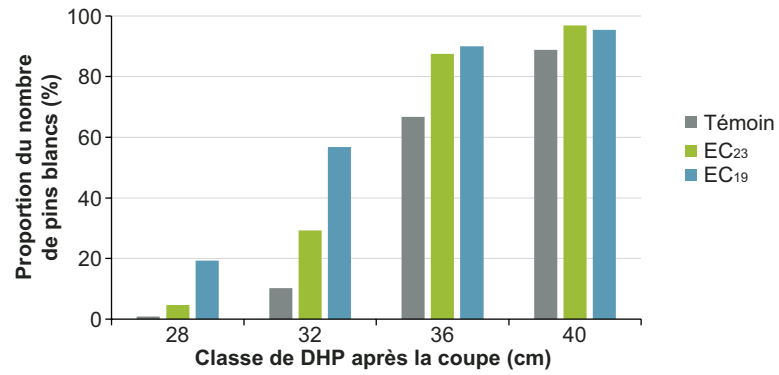



Annexe 5. (suite et fin)

b) Valeur relatives



Annexe 6. Proportion du nombre de pins blancs qui ont atteint ou dépassé le seuil de DHP de 42,1 cm 25 ans après la coupe, par classe de DHP après la coupe et par traitement. La valeur associée à chaque classe de DHP indique la valeur centrale de la classe de 4 cm (p. ex. classe de 40 cm = tiges ayant un DHP de 38,1 à 42,0 cm).





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 blancs âgés de plus de 100 ans situés au nord-ouest de Fort-Coulonge, dans la région de l'Outaouais.