

Direction de la recherche forestière

Titre :	Tables de rendement pour les plantations d'épinette noire et les plantations de pin gris au Québec (version corrigée)
Responsables :	Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc. et Charles Ward, ing.f., M. Sc.
Collaborateurs :	Josianne DeBlois, stat. ASSQ, M. Sc. et Marie-Claude Lambert, M. Sc.
Date :	Février 2021 (version originale) Avril 2024 (version corrigée)

Les plantations monospécifiques d'épinette noire et de pin gris représentent une importante proportion des plantations du Québec. Il est donc important de bien estimer leur rendement futur. Nous proposons ici de nouvelles courbes de rendement pour les plantations de ces deux essences. Celles-ci s'appuient sur des observations provenant de plantations âgées jusqu'à près de 60 ans. Elles prévoient divers attributs dendrométriques des plantations pour une période allant jusqu'à 100 ans, et ce, en fonction de l'indice de qualité de station (IQS) et de la densité de reboisement.

ERRATA : Cette version comporte des corrections mineures apportées au document original diffusé en février 2021 :

- P. 24, équation 6 : les deux derniers termes ont été intervertis.
 - Équation d'origine (erronée) : $V_{0,2} = \exp\left(a_0 + a_1 \ln(HD_2) + a_2 \ln(G_{0,2}) + a_3 \frac{1}{Age_2}\right)$
 - Équation corrigée : $V_{0,2} = \exp\left(a_0 + a_1 \ln(HD_2) + a_2 \frac{1}{Age_2} + a_3 \ln(G_{0,2})\right)$
- P. 1 et 2 : La mise en page a été modifiée pour permettre l'ajout du présent encadré.
- P. 1, en-tête et pied de page : le logo et le nom du ministère ont été mis à jour, de même que les coordonnées de l'autrice de correspondance.
- P. 2, paragraphe 2, ligne 13 : l'adresse courriel de contact a été mise à jour.

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
© Gouvernement du Québec

Contexte

Les tables de rendement des plantations monospécifiques d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) présentement utilisées par le Bureau du forestier en chef sont, entre autres, élaborées à partir des modèles de Bolghari et Bertrand (1984) et de Prégent *et al.* (1996). Ces modèles fournissent des prévisions adéquates de l'état futur des jeunes plantations (maximum d'environ 35 ans).

L'actualisation de ces tables de rendement permettra de vérifier les possibilités annuelles de coupes des prochains calculs des possibilités forestières. Elle améliorera aussi la planification et l'analyse économique des scénarios sylvicoles. Les données provenant du suivi des effets réels des plantations sur 25 ans et du suivi du réseau de vieilles plantations sur une plus longue période ont permis de développer de nouvelles tables de rendement. Pour ce faire, nous avons utilisé les données des plantations réussies pour lesquelles l'essence plantée occupe presque entièrement l'étage dominant. Par ailleurs, les données récoltées depuis plus de 40 ans dans des plantations âgées jusqu'à près de 60 ans ont permis de mettre à jour un tarif de cubage (incluant une relation hauteur-diamètre et une fonction de défilement des tiges), une relation entre la hauteur dominante et l'âge de la plantation, ainsi que les modèles de croissance développés sous la forme de tables de rendement. Les nouveaux modèles prévoient les différents attributs dendrométriques des plantations jusqu'à une période de 100 ans, et ce, en fonction de l'indice de qualité de station (IQS) et la densité de reboisement. Un chiffrier Excel contenant les nouvelles tables de rendement est disponible sur demande auprès des auteurs ou en écrivant à recherche.forestiere@mrmf.gouv.qc.ca.

Méthodologie

2.1. Données

Nous avons utilisé les données provenant de deux réseaux de placettes permanentes de la Direction de la recherche forestière. Le premier réseau contient des placettes permanentes installées de 1970 à 2015 dans des plantations de pin gris alors âgées de 4 à 46 ans et dans des plantations d'épinette noire âgées de 4 à 38 ans. Les placettes étaient mesurées en moyenne tous les 8 ans; elles avaient été suivies pendant un maximum de 44 ans pour les plantations de pin gris et de 31 ans pour les plantations d'épinette noire. Jusqu'en 1994, les arbres plantés, vivants et morts, étaient dénombrés par classe de 2 cm de diamètre à hauteur de poitrine (DHP; mesuré à 1,30 m au compas forestier). À partir de 1995, le DHP des arbres plantés était mesuré au galon circonférentiel, mais les arbres n'étaient pas numérotés. La végétation concurrente était notée par essence et par classe de pourcentage de recouvrement.

Le deuxième réseau est celui du suivi des effets réels des plantations. Les placettes ont été installées de 1995 à 1999 dans des plantations âgées de 6 à 13 ans. Elles étaient mesurées en moyenne tous les 5 ans et avaient été suivies pendant un maximum de 25 ans. Dans ces placettes, tous les arbres sont numérotés, peu importe l'essence, et leur DHP est mesuré au galon circonférentiel.

Les placettes retenues devaient répondre aux critères suivants :

- La placette devait avoir été établie sur une superficie suffisamment grande et être entourée d'au moins deux rangées de bordures;
- L'essence plantée devait représenter au moins 75 % de la surface terrière totale;
- L'essence plantée devait occuper presque entièrement l'étage dominant;
- La plantation devait être composée de plants libres de croûtre lors de l'établissement de la placette;
- La plantation ne devait avoir bénéficié d'aucune éclaircie commerciale et ne pas avoir été fertilisée;
- L'année d'établissement de la plantation et l'espacement initial entre les plants devaient être connus;
- La placette devait avoir au moins un mesurage avec une surface terrière totale de 1 m²/ha ou plus.

Dans les plantations de pin gris, 533 placettes répondaient aux critères de sélection, soit 433 provenant du premier réseau et 100 provenant du réseau des effets réels. Dans les plantations d'épinette noire, 138 placettes provenaient du premier réseau et 121 provenaient du réseau des effets réels, pour un total de 259 placettes. La plantation de pin gris la plus âgée a 59 ans, et celle d'épinette noire a 55 ans.

Nous avons estimé la hauteur de chacun des arbres avec la relation hauteur-diamètre propre à chaque essence développée à partir des observations d'études d'arbres mesurés dans les placettes. Nous avons estimé le volume total et le volume marchand de chacun des arbres à l'aide d'une équation de défilement

étalonnée pour chaque essence. Nous avons développé ces équations à partir d'observations provenant d'arbres en périphérie des placettes.

La hauteur dominante est la hauteur moyenne des 100 plus grands arbres plantés à l'hectare dans la placette. L'IQS est la hauteur dominante à 25 ans estimée avec la relation âge-hauteur dominante que nous avons développée pour chaque essence plantée. Nous avons additionné le nombre d'arbres de chaque placette par mesurage pour obtenir le nombre total d'arbres (N_0), le nombre d'arbres marchands, c'est-à-dire ayant un DHP de plus de 9 cm (N_9), la surface terrière totale (G_0), la surface terrière marchande (G_9 ; surface terrière des arbres marchands), le volume total (V_0) et le volume marchand (V_9 ; volume jusqu'à un diamètre au fin bout de 9 cm des arbres marchands). Nous avons calculé le diamètre moyen quadratique (DQ_0) et le diamètre moyen quadratique marchand (DQ_9) à partir du nombre d'arbres (N_0 et N_9 respectivement) et de la surface terrière (G_0 et G_9 respectivement).

Les caractéristiques des observations prises dans les plantations de pin gris sont présentées au tableau 1, et celles prises dans les plantations d'épinette noire, au tableau 2.

2.2. Méthodes

Nous avons utilisé un modèle dynamique de croissance à l'échelle du peuplement pour modéliser la croissance des plantations des deux essences. Cette approche a comme principal avantage d'utiliser l'information fournie par le suivi temporel des mêmes placettes, sans que l'on ait à écarter les placettes dans lesquelles les arbres n'étaient pas suivis individuellement. Toutefois, seules les placettes avec au moins 2 mesurages peuvent être utilisées (tableau 3). En tout temps, dans ce type de modèle, les conditions initiales du peuplement sont définies par 3 variables d'état (nombre total d'arbres à l'hectare, surface terrière totale et hauteur dominante). Celles-ci servent à estimer le volume total ou marchand à un âge donné. Le modèle utilise 3 fonctions de croissance développées avec l'approche de la différence algébrique pour projeter les variables d'état correspondantes à n'importe quel moment. Le résultat des simulations obtenues avec cette approche ne varie pas selon le pas de simulation, c'est-à-dire que les projections du temps t à $t + 1$, puis du temps $t + 1$ à $t + 2$, donnent la même estimation qu'une seule projection faite du temps t à $t + 2$ (Diéguez-Aranda *et al.* 2006). En plus, le modèle inclut une fonction pour estimer la surface terrière initiale qui peut être utilisée pour établir le point de départ de la simulation. Il inclut aussi une fonction pour estimer le volume total à partir des variables d'état projetées. Nous avons développé un modèle distinct pour chaque essence.

Tableau 1. Caractéristiques des observations dans les plantations de pin gris, par domaine bioclimatique
(n = nombre d'observations; Moy = moyenne; Min = minimum; Max = maximum;
BOJ = bouleau jaune; BOP = bouleau blanc [ou bouleau à papier]).

Variable	Domaine bioclimatique	n	Moy	Min	Max	Variable	Domaine bioclimatique	n	Moy	Min	Max
Densité de reboisement (n ^{bre} de plants/ha)	Érablière à caryer	9	2 918	1 950	4 813	Nombre total d'arbres (n ^{bre} /ha)	Érablière à caryer	9	2 204	1 125	2 925
	Érablière à tilleul	131	2 777	1 000	6 200		Érablière à tilleul	216	1 851	559	4 075
	Érablière à BOJ	100	2 449	747	6 350		Érablière à BOJ	193	1 721	550	4 700
	Sapinière à BOJ	110	2 569	775	6 352		Sapinière à BOJ	263	1 888	400	5 000
	Sapinière à BOP	137	2 489	950	5 175		Sapinière à BOP	375	1 834	675	3 375
	Pessièrre à mousses	46	2 641	1 600	4 100		Pessièrre à mousses	158	2 145	1 125	3 800
Espacement initial (m)	Érablière à caryer	9	1,9	1,4	2,3	Nombre d'arbres marchands (n ^{bre} /ha)	Érablière à caryer	9	1475	24	2 300
	Érablière à tilleul	131	2,0	1,3	3,2		Érablière à tilleul	216	1 141	0	2 725
	Érablière à BOJ	100	2,1	1,3	3,7		Érablière à BOJ	193	1 108	0	2 675
	Sapinière à BOJ	110	2,1	1,3	3,6		Sapinière à BOJ	263	1301	0	3 100
	Sapinière à BOP	137	2,1	1,4	3,2		Sapinière à BOP	375	934	0	2 275
	Pessièrre à mousses	46	2,0	1,6	2,5		Pessièrre à mousses	158	793	0	2 350
Indice de qualité de station (IQS, en m)	Érablière à caryer	9	12,0	5,0	13,6	Volume total (m ³ /ha)	Érablière à caryer	9	112,9	4,9	328,8
	Érablière à tilleul	131	12,7	6,9	16,5		Érablière à tilleul	216	143,1	2,1	500,3
	Érablière à BOJ	100	13,1	7,8	19,0		Érablière à BOJ	193	145,8	1,9	501,2
	Sapinière à BOJ	110	12,5	8,9	15,6		Sapinière à BOJ	263	128,0	2,7	346,7
	Sapinière à BOP	137	10,9	5,8	14,9		Sapinière à BOP	375	73,2	1,9	392,8
	Pessièrre à mousses	46	10,5	5,8	14,2		Pessièrre à mousses	158	49,6	2,0	217,1
Âge de la plantation (ans)	Érablière à caryer	9	22	13	35	Volume marchand (m ³ /ha)	Érablière à caryer	9	79,2	0,3	278,4
	Érablière à tilleul	216	27	5	59		Érablière à tilleul	216	119,2	0,0	482,7
	Érablière à BOJ	193	25	6	58		Érablière à BOJ	193	124,5	0,0	492,9
	Sapinière à BOJ	263	24	7	52		Sapinière à BOJ	263	101,9	0,0	341,3
	Sapinière à BOP	375	23	7	50		Sapinière à BOP	375	52,8	0,0	378,3
	Pessièrre à mousses	158	20	6	36		Pessièrre à mousses	158	27,1	0,0	184,0
Hauteur dominante (m)	Érablière à caryer	9	10,6	4,6	17,5	Diamètre moyen quadratique (cm)	Érablière à caryer	9	10,1	5,1	14,9
	Érablière à tilleul	216	12,4	3,2	23,7		Érablière à tilleul	216	12,3	2,6	24,7
	Érablière à BOJ	193	12,2	2,9	23,8		Érablière à BOJ	193	12,7	2,4	25,6
	Sapinière à BOJ	263	11,9	3,3	22,2		Sapinière à BOJ	263	12,2	2,7	26,1
	Sapinière à BOP	375	9,3	2,9	20,7		Sapinière à BOP	375	10,0	2,5	20,8
	Pessièrre à mousses	158	8,1	3,0	15,4		Pessièrre à mousses	158	8,3	2,2	15,1
Surface terrière totale (m ² /ha)	Érablière à caryer	9	19,7	2,3	42,6	Diamètre moyen quadratique marchand (cm)	Érablière à caryer	9	11,5	10,2	15,2
	Érablière à tilleul	216	20,9	1,1	50,8		Érablière à tilleul	199	14,0	10,0	24,7
	Érablière à BOJ	193	21,5	1,0	48,3		Érablière à BOJ	167	14,7	9,6	25,6
	Sapinière à BOJ	263	21,7	1,4	44,3		Sapinière à BOJ	233	13,8	9,3	26,1
	Sapinière à BOP	375	15,2	1,0	41,0		Sapinière à BOP	299	12,5	9,1	20,8
	Pessièrre à mousses	158	12,6	1,1	33,0		Pessièrre à mousses	124	11,1	9,1	15,1
Surface terrière marchande (m ² /ha)	Érablière à caryer	9	17,1	0,2	41,9						
	Érablière à tilleul	216	18,9	0,0	50,6						
	Érablière à BOJ	193	19,8	0,0	48,3						
	Sapinière à BOJ	263	20,0	0,0	44,1						
	Sapinière à BOP	375	12,8	0,0	41,0						
	Pessièrre à mousses	158	8,7	0,0	33,0						

Tableau 2. Caractéristiques des observations dans les plantations d'épinette noire, par domaine bioclimatique (n = nombre d'observations; Moy = moyenne; Min = minimum; Max = maximum; BOJ = bouleau jaune; BOP = bouleau blanc [ou bouleau à papier]).

Variable	Domaine bioclimatique	n	Moy	Min	Max	Variable	Domaine bioclimatique	n	Moy	Min	Max
Densité de reboisement (n ^{bre} de plants/ha)	Érablière à tilleul	18	2 832	1 875	7 653	Nombre total d'arbres (n ^{bre} /ha)	Érablière à tilleul	28	2 579	1 025	5 459
	Érablière à BOJ	57	2 617	1 300	4 250		Érablière à BOJ	158	2 252	925	4 525
	Sapinière à BOJ	66	2 732	1 300	6 000		Sapinière à BOJ	212	2 153	725	5 900
	Sapinière à BOP	82	2 510	800	6 000		Sapinière à BOP	268	2 046	650	3 950
	Pessièrre à mousses	36	2 501	1 775	3 700		Pessièrre à mousses	150	2 010	975	2 875
Espacement initial (m)	Érablière à tilleul	18	2,0	1,1	2,3	Nombre d'arbres marchands (n ^{bre} /ha)	Érablière à tilleul	28	1 438	0	3 878
	Érablière à BOJ	57	2,0	1,5	2,8		Érablière à BOJ	158	1 216	0	2 800
	Sapinière à BOJ	66	2,0	1,3	2,8		Sapinière à BOJ	212	1 050	0	3 175
	Sapinière à BOP	82	2,1	1,3	3,5		Sapinière à BOP	268	772	0	3 150
	Pessièrre à mousses	36	2,0	1,6	2,4		Pessièrre à mousses	150	747	0	2 375
Indice de qualité de station (IQS, en m)	Érablière à tilleul	18	9,9	8,6	11,6	Volume total (m ³ /ha)	Érablière à tilleul	28	86,5	4,8	186,5
	Érablière à BOJ	57	9,9	6,6	12,3		Érablière à BOJ	158	77,0	2,5	221,0
	Sapinière à BOJ	66	9,9	6,9	13,1		Sapinière à BOJ	212	63,9	2,4	244,4
	Sapinière à BOP	82	8,3	4,4	10,9		Sapinière à BOP	268	49,4	2,3	337,8
	Pessièrre à mousses	36	8,0	4,5	10,2		Pessièrre à mousses	150	45,5	2,5	213,8
Âge de la plantation (ans)	Érablière à tilleul	28	25	10	39	Volume marchand (m ³ /ha)	Érablière à tilleul	28	56,8	0,0	132,3
	Érablière à BOJ	158	24	8	52		Érablière à BOJ	158	51,7	0,0	177,5
	Sapinière à BOJ	212	22	8	43		Sapinière à BOJ	212	41,9	0,0	223,7
	Sapinière à BOP	268	24	10	55		Sapinière à BOP	268	31,1	0,0	309,4
	Pessièrre à mousses	150	26	12	41		Pessièrre à mousses	150	25,8	0,0	179,0
Hauteur dominante (m)	Érablière à tilleul	28	9,7	2,9	14,5	Diamètre moyen quadratique (cm)	Érablière à tilleul	28	9,9	2,6	14,5
	Érablière à BOJ	158	9,5	3,4	16,5		Érablière à BOJ	158	9,9	2,6	17,0
	Sapinière à BOJ	212	8,9	3,2	16,9		Sapinière à BOJ	212	9,6	2,5	18,5
	Sapinière à BOP	268	7,8	3,3	17,9		Sapinière à BOP	268	8,4	2,5	21,4
	Pessièrre à mousses	150	8,3	3,5	14,9		Pessièrre à mousses	150	8,2	2,4	15,3
Surface terrière totale (m ² /ha)	Érablière à tilleul	28	20,8	2,0	44,8	Diamètre moyen quadratique marchand (cm)	Érablière à tilleul	24	12,5	10,2	14,7
	Érablière à BOJ	158	18,7	1,1	40,2		Érablière à BOJ	128	12,4	9,5	17,0
	Sapinière à BOJ	212	16,4	1,0	44,9		Sapinière à BOJ	173	12,1	9,1	18,9
	Sapinière à BOP	268	13,0	1,0	53,2		Sapinière à BOP	201	11,6	9,1	21,7
	Pessièrre à mousses	150	12,1	1,1	39,8		Pessièrre à mousses	115	11,2	9,1	15,6
Surface terrière marchande (m ² /ha)	Érablière à tilleul	28	18,1	0,0	38,0						
	Érablière à BOJ	158	15,8	0,0	39,5						
	Sapinière à BOJ	212	13,4	0,0	44,9						
	Sapinière à BOP	268	9,8	0,0	51,9						
	Pessièrre à mousses	150	8,6	0,0	38,8						

Tableau 3. Caractéristiques au début des intervalles de croissance des placettes dans les plantations de pin gris et d'épinette noire (n = nombre d'observations; Moy = moyenne; Min = minimum; Max = maximum).

Variable	Pin gris				Épinette noire			
	n	Moy	Min	Max	n	Moy	Min	Max
Densité de reboisement (n ^{bre} de plants/ha)	233	2 525	775	6 352	202	2 577	800	7 653
Espacement initial (m)	233	2,1	1,3	3,6	202	2,0	1,1	3,5
Indice de qualité de station (m)	233	11,8	5,8	19,0	202	9,2	4,4	13,1
Âge de la plantation (ans)	681	23	6	54	557	22	8	51
Hauteur dominante (m)	681	10,3	3,0	23,7	557	7,9	2,9	16,8
Surface terrière totale (m ² /ha)	681	17,6	1,0	48,3	557	12,9	1,0	48,0
Surface terrière marchande (m ² /ha)	681	15,1	0,0	48,3	557	9,3	0,0	47,5
Nombre total d'arbres (n ^{bre} /ha)	681	1 894	600	4 488	557	2 151	700	5 459
Nombre d'arbres marchands (n ^{bre} /ha)	681	995	0	2 850	557	802	0	3 418
Volume total (m ³ /ha)	681	98,1	1,9	501,2	557	46,9	2,3	288,2
Volume marchand (m ³ /ha)	681	76,4	0,0	492,9	557	26,9	0,0	254,3
Diamètre moyen quadratique (cm)	681	10,8	2,2	24,9	557	8,2	2,4	20,6
Diamètre moyen quadratique marchand (cm)	564	13,1	9,1	24,9	410	11,4	9,1	20,8

Nous avons testé différentes fonctions pour projeter les variables d'état dans le temps. Pour la fonction de croissance du nombre total d'arbres, nous avons testé différentes fonctions présentées dans Zhao *et al.* (2007) pour des plantations de pin taeda (*Pinus taeda* L.); dans cette étude, le taux de mortalité instantané est relié à l'âge, à l'IQS et à la densité par une équation différentielle. Nous avons testé la fonction de croissance et la fonction initiale de la surface terrière totale de Coble (2009) pour des plantations de pin taeda et de pin d'Elliott (*Pinus elliotii* Engelm.) et celles de Castedo-Dorado (2007) pour des plantations de pin de Monterey (*Pinus radiata* D.Don.). Pour la fonction de croissance de la hauteur dominante, nous avons testé des équations de différence basées sur les fonctions de Chapman-Richards, Hossfeld, Gompertz, Schumacher et Weibull. Nous avons utilisé la fonction de Coble (2009) pour estimer le volume total.

Nous avons utilisé l'approche présentée par Amateis *et al.* (1986) et par Lenhart (1996) pour convertir un rendement total en rendement marchand. Dans cette approche, la proportion du rendement total est estimée en fonction du seuil minimal de DHP et du diamètre moyen quadratique. La proportion est ensuite multipliée par le rendement total. De cette façon, le rendement marchand ne dépasse jamais le rendement total.

En plus du modèle de type dynamique, nous avons testé l'approche du modèle statique, notamment avec celui utilisé pour les plantations d'épinette blanche (Prégent *et al.* 2010) et celui pour les plantations d'épinette de Norvège (Prégent *et al.* 2016).

Nous avons choisi le modèle final en comparant les valeurs estimées et les valeurs observées. Pour les modèles dynamiques, nous avons utilisé les informations de la placette au premier mesurage (âge, IQS, nombre d'arbres et hauteur dominante) pour estimer les caractéristiques de la placette au 2^e mesurage. Pour les mesurages 3 et plus, les caractéristiques estimées au mesurage précédent ont servi d'intrants pour estimer les caractéristiques au mesurage suivant. Nous avons ainsi pu évaluer le comportement du modèle lorsqu'on enchaîne les prévisions sur 4 mesurages pour le pin gris et sur 3 mesurages pour l'épinette noire. Nous avons calculé le biais et l'erreur quadratique moyenne sur l'ensemble des observations et par mesurage (validation croisée, en retirant une placette à la fois) :

$$\text{biais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \qquad \text{erreur} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

où y_i est la valeur de l'observation i , \hat{y}_i est la valeur estimée de l'observation i et n est le nombre d'observations.

Nous avons aussi regardé les biais par classe d'âge, d'IQS et de densité de reboisement (résultats non présentés), ainsi que des graphiques superposant les courbes des valeurs estimées à celles des trajectoires des placettes pour les variables d'intérêt. Une telle inspection visuelle est essentielle pour sélectionner le modèle le plus approprié, car le profil des courbes peut différer radicalement entre les modèles, même si les critères statistiques et les résidus ($y_i - \hat{y}_i$) sont semblables. Nous avons aussi tenu compte du réalisme du comportement du modèle sur une période dépassant l'âge maximal des plantations dans notre jeu de données, soit 100 ans. Nous avons aussi comparé les rendements estimés avec des sources externes (dispositifs expérimentaux en plantations de la DRF et courbes du rendement en forêts naturelles pour le Québec et d'autres provinces).

Nous avons aussi comparé les courbes d'estimation du rendement avec le modèle final et les courbes de rendement en plantation présentement utilisées par le Bureau du forestier en chef (BFEC) pour le calcul des possibilités forestières (Poulin 2013). Ces dernières sont basées sur le modèle de Bolghari et Bertrand (1984) pour les plantations de pin gris et sur le modèle de Prégent *et al.* (1996) pour les plantations d'épinette noire. Dans ces deux modèles, l'âge utilisé est l'âge total, qui inclut les 4 années en pépinière. Nous avons donc soustrait 4 ans à l'âge total pour obtenir l'âge de plantation. Pour le pin gris, l'IQS des courbes de Bolghari et Bertrand (1984) est la hauteur dominante à un âge total de 15 ans. Nous l'avons transformé en utilisant la hauteur dominante estimée à un âge de plantation de 25 ans sur la courbe du BFEC. Pour l'épinette noire, nous avons transformé l'IQS (hauteur dominante à un âge total de 25 ans) en utilisant la hauteur dominante à un âge de plantation de 25 ans. Ainsi, pour les courbes du BFEC de pin

gris, les IQS de 4, 5, 6 et 7 m à un âge total de 15 ans sont devenus des IQS de 9, 11, 13 et 15 m à un âge de plantation de 25 ans. Pour l'épinette noire, les IQS de 5, 6, 7, 8 et 9 m à un âge total de 25 ans sont devenus des IQS de 7, 8, 9, 10 et 11 m à un âge de plantation de 25 ans.

Résultats

Selon le biais, l'erreur quadratique moyenne et le comportement à long terme du modèle, nous avons choisi un modèle dynamique et utilisé les mêmes fonctions pour les plantations de pin gris et celles d'épinette noire, pour toutes les variables sauf la hauteur dominante. Pour cette dernière, nous avons retenu l'équation de différence basée sur la fonction de Hossfeld pour les plantations d'épinette noire et celle basée sur la fonction de Weibull pour les plantations de pin gris. Nous avons retenu les fonctions de Coble (2009) pour estimer le nombre d'arbres ainsi que le volume total, et celles de Castedo-Dorado (2007) pour estimer la surface terrière totale initiale et la croissance de la surface terrière totale. Les équations du modèle retenu, de même que la valeur estimée de leurs paramètres, sont présentées à l'annexe 1; les étapes à suivre pour générer les courbes de rendement sont présentées à l'annexe 2. Le coefficient de détermination des équations du modèle des plantations de pin gris varie de 0,911 à 0,999, et celui du modèle des plantations d'épinette noire varie de 0,877 à 0,998 (tableau 4).

Tableau 4. Coefficient de détermination (R^2) et écart type des erreurs résiduelles ($\hat{\sigma}$) des équations des modèles pour les plantations de pin gris et d'épinette noire.

Variable	Pin gris		Épinette noire	
	R^2	$\hat{\sigma}$	R^2	$\hat{\sigma}$
Hauteur dominante (m)	0,979	0,6	0,975	0,4
Surface terrière initiale (m ² /ha)	0,921	3,1	0,913	3,1
Surface terrière totale (m ² /ha)	0,925	2,7	0,956	2,0
Volume total (m ³ /ha)	0,994	8,1	0,997	2,8
Nombre total d'arbres (n ^{bre} /ha)	0,911	161,3	0,877	187,6
Surface terrière marchande (m ² /ha)	0,997	0,6	0,996	0,7
Volume marchand (m ³ /ha)	0,999	3,6	0,998	2,0
Nombre d'arbres marchands (n ^{bre} /ha)	0,976	91,9	0,979	103,8

Pour les plantations de pin gris, les prévisions de la hauteur dominante, du nombre total d'arbres, du diamètre moyen quadratique et de la surface terrière totale initiale ont des biais de 5 % ou moins (tableau 5). Les biais des prévisions de surface terrière totale et du volume total atteignent 9 % après 4 mesurages (tableau 5). L'ensemble des prévisions pour les caractéristiques marchandes est surestimé à un degré variant selon la variable. La surestimation est relativement stable à environ 4 % pour le diamètre moyen quadratique marchand. Celle du nombre d'arbres marchands diminue avec le nombre de mesurages, passant de 10 % à 2,5 %. Celles de la surface terrière marchande et du volume marchand augmentent avec le nombre de mesurages, atteignant 10 % après 4 mesurages.

Tableau 5. Biais et erreurs en validation croisée du modèle pour les plantations de pin gris (valeurs relatives entre parenthèses; n = nombre d'observations; Moy. obs. = moyenne observée).

Variable	Mesurage*	n	Âge moyen	Tous les arbres			Arbres marchands		
				Moy. obs.	Biais	Erreur	Moy. obs.	Biais	Erreur
Hauteur dominante (m)	Tous	681	29	12,9	-0,05 (-0,4 %)	0,6 (4,7 %)			
	1	233	24	11,1	-0,03 (-0,3 %)	0,7 (6,2 %)			
	2	174	28	12,3	-0,10 (-0,8 %)	0,7 (5,5 %)			
	3	151	32	13,9	-0,02 (-0,1 %)	0,5 (3,9 %)			
	4	123	36	15,8	-0,05 (-0,3 %)	0,4 (2,4 %)			
Surface terrière initiale (m ² /ha)	1	233	16	10,7	-0,4 (-3,7 %)	3,1 (29,0 %)			
Surface terrière (m ² /ha)	Tous	681	29	22,5	-1,2 (-5,4 %)	4,7 (21,1 %)	20,6	-1,7 (-8,1 %)	5,4 (26,2 %)
	1	233	24	19,5	-0,6 (-3,1 %)	4,2 (21,4 %)	16,5	-1,0 (-6,2 %)	4,7 (28,4 %)
	2	174	28	22,0	-0,8 (-3,5 %)	4,4 (19,8 %)	19,8	-1,4 (-7,3 %)	5,4 (27,0 %)
	3	151	32	24,1	-1,7 (-7,2 %)	5,3 (21,8 %)	22,8	-2,3 (-9,9 %)	6,1 (26,5 %)
	4	123	36	26,9	-2,4 (-8,9 %)	5,6 (20,6 %)	26,4	-2,5 (-9,4 %)	5,8 (21,8 %)
Volume (m ³ /ha)	Tous	681	29	141,7	-5,6 (-3,9 %)	33,0 (23,3 %)	116,3	-6,7 (-5,8 %)	33,9 (29,1 %)
	1	233	24	113,3	0,8 (0,7 %)	26,7 (23,5 %)	88,9	0,0 (0,1 %)	27,4 (30,8 %)
	2	174	28	130,4	-3,1 (-2,4 %)	29,5 (22,6 %)	104,6	-4,6 (-4,4 %)	30,6 (29,2 %)
	3	151	32	155,5	-9,4 (-6,0 %)	37,3 (24,0 %)	128,9	-11,1 (-8,6 %)	38,3 (29,7 %)
	4	123	36	194,5	-16,5 (-8,5 %)	41,7 (21,4 %)	169,1	-17,4 (-10,3 %)	42,5 (25,1 %)
Nombre total d'arbres (n ^{bre} /ha)	Tous	681	29	1750	23 (1,3 %)	262 (14,9 %)	1 254	-100 (-7,9 %)	348 (27,8 %)
	1	233	24	1875	25 (1,3 %)	185 (9,9 %)	1 070	-110 (-10,3 %)	332 (31,0 %)
	2	174	28	1798	43 (2,4 %)	230 (12,8 %)	1 272	-129 (-10,1 %)	388 (30,5 %)
	3	151	32	1690	31 (1,9 %)	307 (18,2 %)	1 385	-102 (-7,3 %)	356 (25,7 %)
	4	123	36	1519	-15 (-1,0 %)	350 (23,1 %)	1 416	-36 (-2,5 %)	307 (21,7 %)
Diamètre moyen quadratique (cm)	Tous	681	29	13,1	-0,5 (-4,2 %)	1,6 (12,3 %)	13,9	-0,5 (-3,6 %)	1,7 (12,2 %)
	1	233	24	11,5	-0,4 (-3,7 %)	1,4 (12,1 %)	12,9	-0,6 (-4,3 %)	2,2 (16,7 %)
	2	174	28	12,7	-0,5 (-4,0 %)	1,6 (12,5 %)	13,6	-0,3 (-2,3 %)	1,2 (8,8 %)
	3	151	32	13,9	-0,7 (-5,3 %)	1,8 (13,3 %)	14,4	-0,6 (-3,8 %)	1,5 (10,3 %)
	4	123	36	15,6	-0,6 (-3,7 %)	1,7 (11,1 %)	15,8	-0,6 (-3,9 %)	1,6 (10,3 %)

* Les résultats des mesurages 5 à 8 ont été regroupés avec ceux du mesurage 4, car il y avait trop peu d'observations.

Pour les plantations d'épinette noire, les prévisions de la hauteur dominante et des caractéristiques de tous les arbres ont des biais généralement inférieurs à 6 % (tableau 6). Pour les arbres marchands, l'ensemble des caractéristiques sont surestimées, à des degrés variables selon la caractéristique. La surestimation des prévisions de la surface terrière marchande et du volume marchand augmentent avec le nombre de mesurages, atteignant respectivement 7 % et 10 % après 3 mesurages.

Tableau 6. Biais et erreurs en validation croisée du modèle pour les plantations d'épinette noire (valeurs relatives entre parenthèses; n = nombre d'observations; Moy. obs. = moyenne observée).

Variable	Mesurage*	n	Âge moyen	Tous les arbres			Arbres marchands		
				Moy. obs.	Biais	Erreur	Moy. obs.	Biais	Erreur
Hauteur dominante (m)	Tous	557	27	9,7	0,05 (0,5 %)	0,4 (4,5 %)			
	1	202	23	8,3	0,11 (1,3 %)	0,6 (7,0 %)			
	2	169	27	9,8	0,06 (0,6 %)	0,5 (4,6 %)			
	3	186	31	11,2	-0,02 (-0,2 %)	0,2 (1,5 %)			
Surface terrière initiale (m ² /ha)	1	202	17	7,0	-0,6 (-8,5 %)	2,8 (40,3 %)			
Surface terrière (m ² /ha)	Tous	557	27	18,6	-0,5 (-2,5 %)	4,9 (26,2 %)	15,5	-0,6 (-4,2 %)	5,6 (36,0 %)
	1	202	23	14,4	0,0 (0,0 %)	4,3 (30,1 %)	10,1	0,1 (0,5 %)	4,8 (47,8 %)
	2	169	27	19,0	-0,3 (-1,8 %)	5,0 (26,4 %)	16,0	-0,6 (-3,9 %)	5,9 (36,7 %)
	3	186	31	22,8	-1,1 (-4,7 %)	5,3 (23,1 %)	21,0	-1,4 (-6,8 %)	6,1 (29,0 %)
Volume (m ³ /ha)	Tous	557	27	74,7	-2,1 (-2,8 %)	23,1 (30,8 %)	49,7	-2,7 (-5,5 %)	22,2 (44,7 %)
	1	202	23	54,1	0,6 (1,1 %)	20,7 (38,2 %)	32,1	0,8 (2,5 %)	19,5 (60,6 %)
	2	169	27	74,9	-1,3 (-1,7 %)	24,0 (32,1 %)	48,7	-2,0 (-4,1 %)	22,8 (46,8 %)
	3	186	31	97,0	-5,7 (-5,9 %)	24,6 (25,4 %)	69,7	-7,2 (-10,3 %)	24,4 (35,0 %)
Nombre total d'arbres (n ^{bre} /ha)	Tous	557	27	2083	86 (4,1 %)	258 (12,4 %)	1 223	-14 (-1,2 %)	390 (31,9 %)
	1	202	23	2 121	51 (2,4 %)	225 (10,6 %)	850	-9 (-1,0 %)	369 (43,4 %)
	2	169	27	2 112	95 (4,5 %)	257 (12,2 %)	1 310	-25 (-1,9 %)	424 (32,4 %)
	3	186	31	2015	116 (5,8 %)	290 (14,4 %)	1550	-10 (-0,6 %)	380 (24,5 %)
Diamètre quadratique moyen (cm)	Tous	557	27	10,5	-0,4 (-3,8 %)	1,5 (14,0 %)	12,0	-0,3 (-2,2 %)	1,1 (9,4 %)
	1	202	23	9,0	-0,1 (-1,1 %)	1,4 (15,7 %)	11,2	0,0 (0,4 %)	1,1 (10,3 %)
	2	169	27	10,6	-0,4 (-3,7 %)	1,4 (13,3 %)	12,0	-0,2 (-2,0 %)	1,1 (9,6 %)
	3	186	31	12,0	-0,7 (-6,0 %)	1,6 (13,0 %)	12,9	-0,6 (-4,3 %)	1,1 (8,5 %)

* Les résultats des mesurages 4 à 6 ont été regroupés avec ceux du mesurage 3, car il y avait trop peu d'observations.

En général, pour les plantations de pin gris, les courbes estimées du rendement en volume marchand (figures 1 et 2), en nombre d'arbres marchands (figure 2), en surface terrière marchande et en diamètre moyen quadratique marchand (figure 3) suivent assez bien la trajectoire des placettes associées aux classes d'IQS de 7 à 15 m. Pour l'IQS de 9 m, les courbes actuellement utilisées par le BFEC sont au-dessus des trajectoires des placettes et surestiment donc le rendement en volume marchand (figure 2). Pour les IQS 11 et 13 m, les nouvelles courbes de rendement en volume marchand sont semblables à celles du BFEC jusqu'à environ 60 ans (figure 2). Pour l'IQS de 15 m, les nouvelles courbes sont supérieures à celles du BFEC jusqu'à environ 60 ans, ces dernières suivant la trajectoire des placettes les moins productives (figure 2). Pour la surface terrière marchande, les nouvelles courbes sont inférieures aux courbes du BFEC (figure 3). Pour le diamètre moyen quadratique, les courbes de rendement du BFEC à des IQS de 9 à 15 m sont supérieures aux nouvelles courbes et aux trajectoires des placettes (figure 3). De plus, elles ne semblent pas suivre la bonne trajectoire, si on les compare à celle des placettes.

Pour les plantations d'épinette noire, les courbes estimées de rendement en volume marchand (figures 1 et 4), en nombre d'arbres marchands (figure 4), en surface terrière marchande et en diamètre moyen

quadratique marchand (figure 5) suivent généralement assez bien la trajectoire des placettes associées aux classes d'IQS de 6 à 11 m. Les nouvelles courbes de rendement en volume marchand sont semblables à celles du BFEC jusqu'à un âge d'environ 70 ans pour les IQS de 7 à 11 m (figure 4). Dans le cas de la surface terrière, les nouvelles courbes de rendement sont semblables à celles du BFEC pour les IQS de 7 et de 11 m, mais inférieures à celles-ci pour les IQS de 8 à 10 m, particulièrement pour des âges de plus de 40 ans (figure 5). Quant au diamètre moyen quadratique, les courbes du BFEC sont en général supérieures aux nouvelles courbes et aux trajectoires des placettes pour les IQS de 7 à 11 m (figure 5).

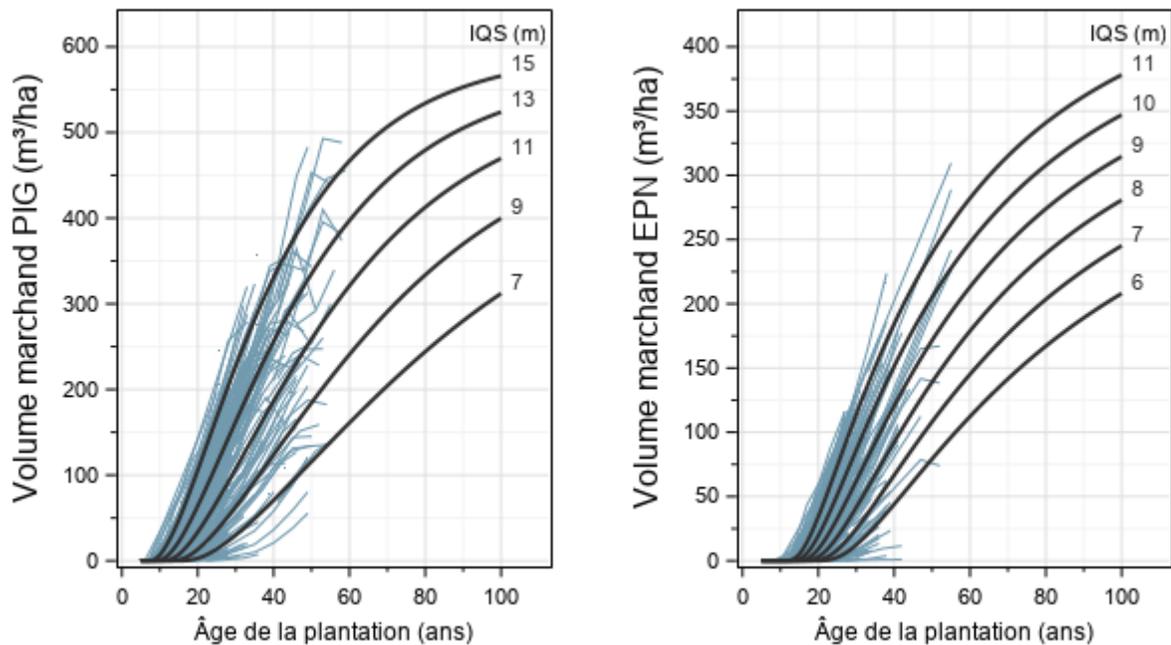


Figure 1. Comparaison des nouvelles courbes de rendement en volume marchand (lignes noires) et des trajectoires des placettes (lignes bleues) pour le pin gris (PIG, graphique de gauche) et l'épinette noire (EPN, graphique de droite). Courbes pour le pin gris : densité de reboisement de 2 100 plants/ha. Courbes pour l'épinette noire : densité de reboisement de 2 300 plants/ha.

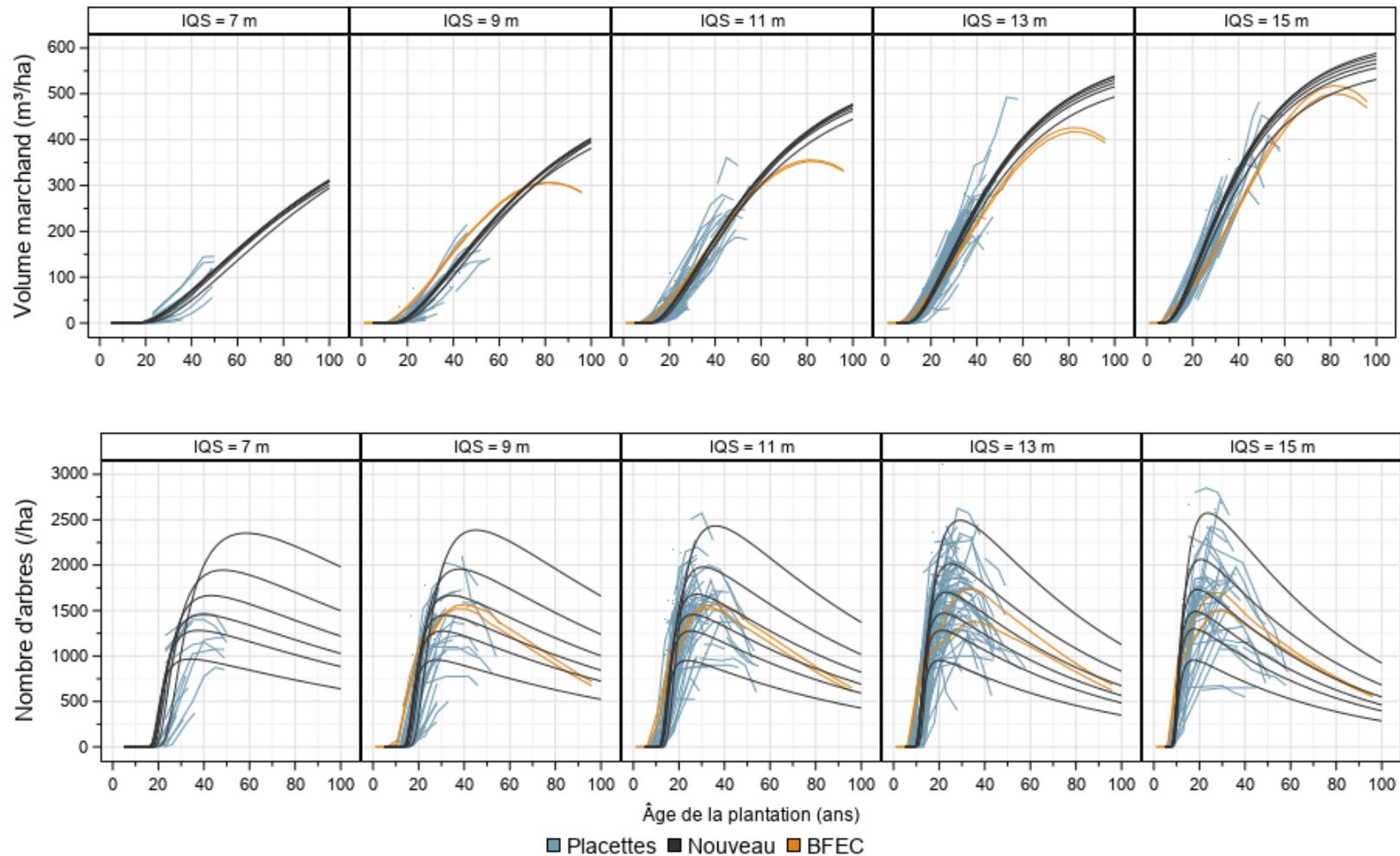


Figure 2. Comparaison des nouvelles courbes de rendement en volume marchand et en nombre d'arbres marchands, des courbes du BFEC et des trajectoires des placettes par IQS, pour le pin gris. Les nouvelles courbes sont calculées pour des densités de reboisement de 1 300, 1 800, 2 100, 2 500, 3 100 et 4 200 plants/ha (du bas vers le haut dans chaque graphique); les courbes du BFEC sont calculées pour des densités de reboisement de 1 600 et 2 000 plants/ha (du bas vers le haut).

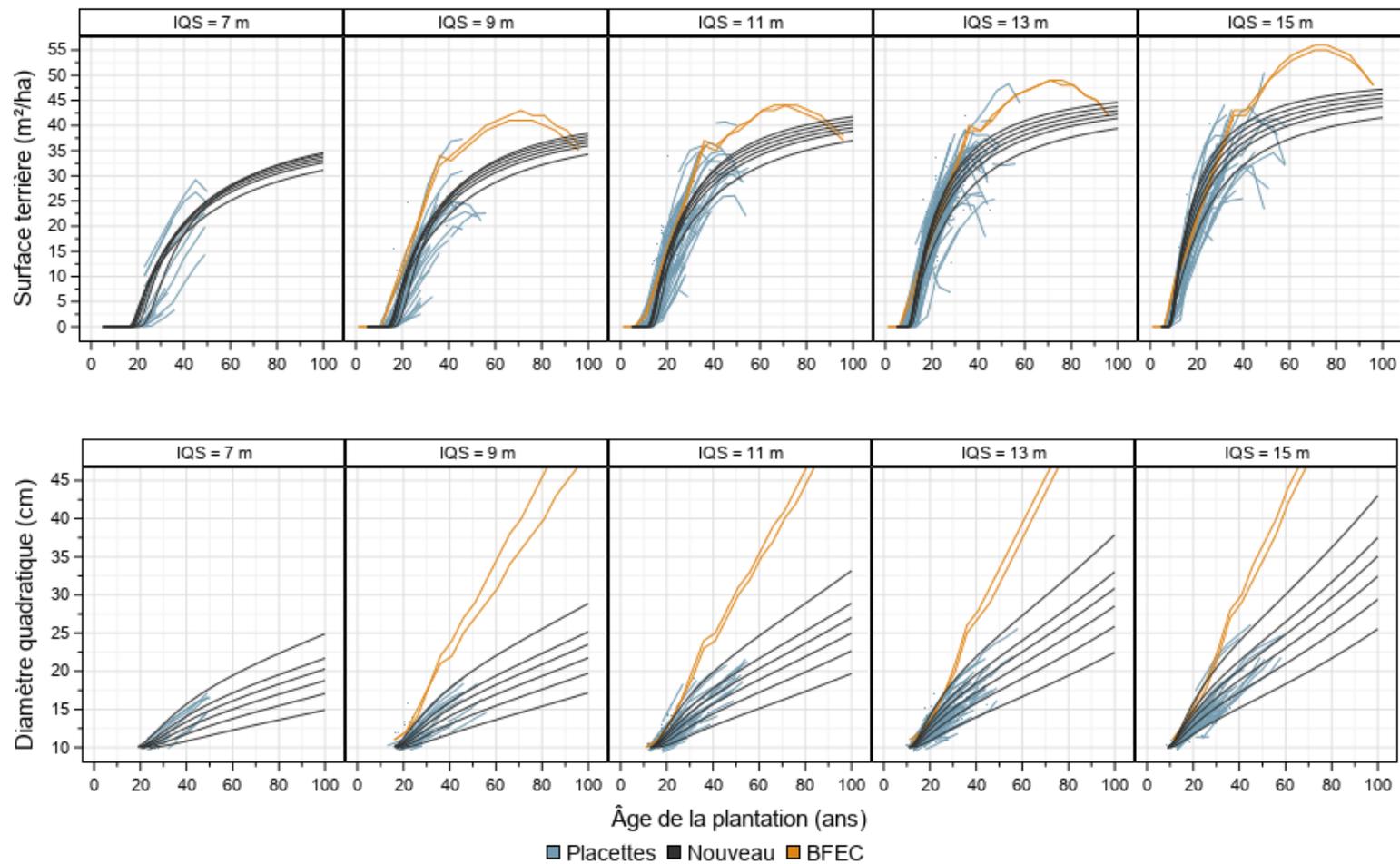


Figure 3. Comparaison des nouvelles courbes de rendement en surface terrière marchand et en diamètre quadratique marchand, des courbes du BFEC et des trajectoires des placettes par IQS, pour le pin gris. Les nouvelles courbes sont calculées pour des densités de reboisement de 1 300, 1 800, 2 100, 2 500, 3 100 et 4 200 plants/ha (du bas vers le haut pour la surface terrière et du haut vers le bas pour le diamètre quadratique dans chaque graphique); les courbes du BFEC sont calculées pour des densités de reboisement de 1 600 et 2 000 plants/ha (du bas vers le haut pour la surface terrière et du haut vers le bas pour le diamètre quadratique).

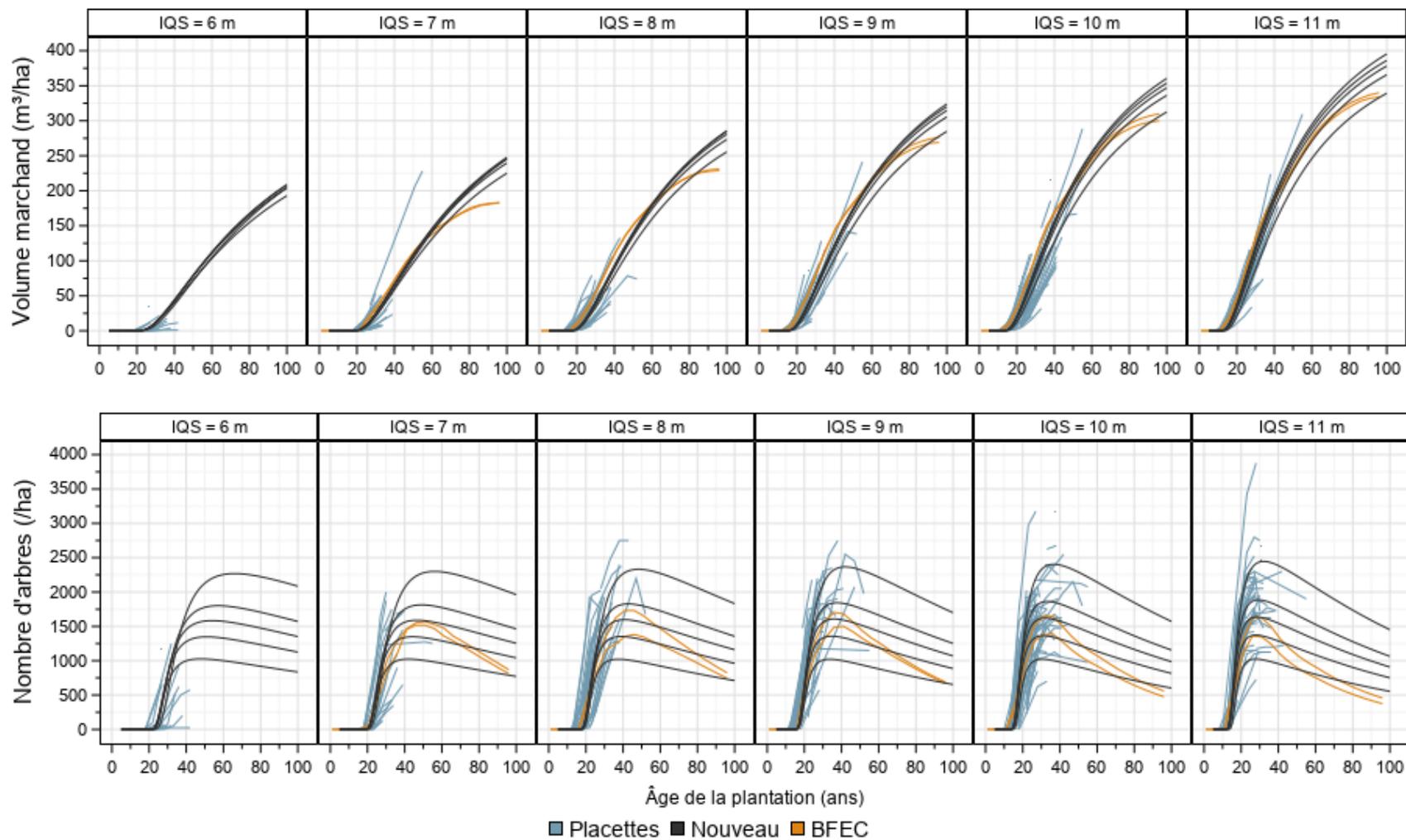


Figure 4. Comparaison des nouvelles courbes de rendement en volume marchand et en nombre d'arbres marchands, des courbes du BFEC et des trajectoires des placettes par IQS, pour l'épinette noire. Les nouvelles courbes sont calculées pour des densités de reboisement de 1 400, 1 900, 2 300, 2 700 et 3 700 plants/ha (du bas vers le haut dans chaque graphique); les courbes du BFEC sont calculées pour des densités de reboisement de 1 600 et 2 000 plants/ha (du bas vers le haut).

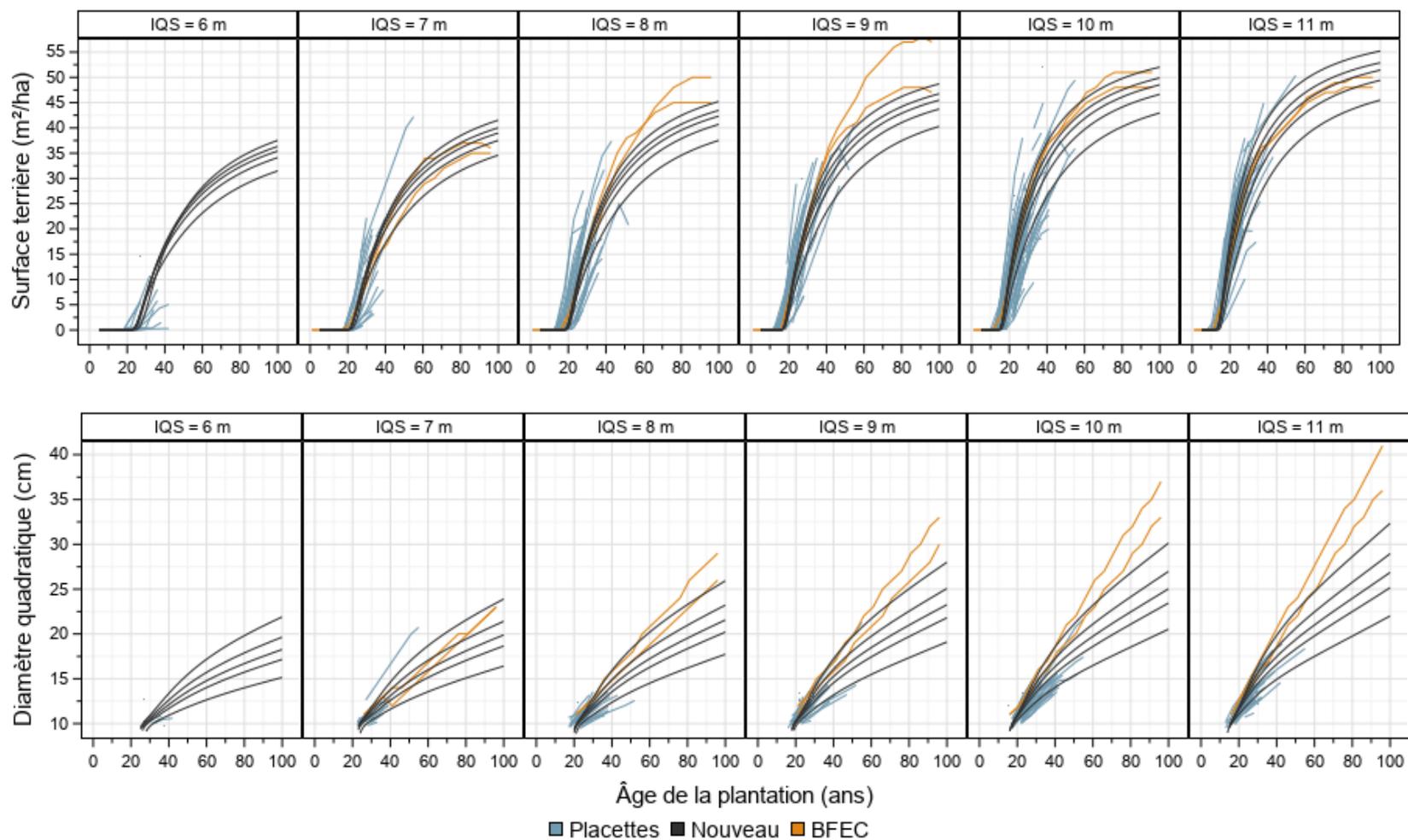


Figure 5. Comparaison des nouvelles courbes de rendement en surface terrière marchande et diamètre quadratique marchand, des courbes du BFEC et des trajectoires des placettes par IQS, pour l'épinette noire. Les nouvelles courbes sont calculées pour des densités de reboisement de 1 400, 1 900, 2 300, 2 700 et 3 700 plants/ha (du bas vers le haut pour la surface terrière et du haut vers le bas pour le diamètre quadratique dans chaque graphique); les courbes du BFEC sont calculées pour des densités de reboisement de 1 600 et 2 000 plants/ha (du bas vers le haut pour la surface terrière et du haut vers le bas pour le diamètre quadratique).

La figure 6 présente les courbes de rendement en volume marchand des deux essences pour des IQS donnés et pour 3 densités de reboisement.

Pour les plantations de pin gris, les âges d'exploitabilité estimés avec les nouvelles courbes de rendement varient de 96 ans pour un IQS de 7 m à 43 ans pour un IQS de 15 m (tableau 7, densité de reboisement : 2 000 plants/ha). Ils sont en général plus grands que ceux estimés avec les courbes du BFEC. L'écart diminue avec l'IQS, passant de 26 ans pour un IQS de 9 m à -3 ans pour un IQS de 15 m (tableau 7, densité de 2 000 plants/ha). Cependant, le volume marchand à l'âge d'exploitabilité est plus grand avec les nouvelles courbes (écarts variant de 104 à 40 m³/ha pour un IQS de 9 à 15 m, 2 000 plants/ha), tandis que le diamètre moyen quadratique est plus petit (écarts variant de -6,1 à -10,7 cm pour un IQS de 9 à 15 m, 2 000 plants/ha, tableau 7).

Tableau 7. Âge d'exploitabilité (AE), volume marchand et diamètre moyen quadratique marchand à l'âge d'exploitabilité obtenus avec les nouvelles courbes de rendement et celles du BFEC, pour le pin gris. L'écart entre les deux modèles est aussi présenté.

Densité de reboisement (n ^{bre} de plants/ha)	Classe d'IQS (m)	Modèle	AE (ans)	Volume marchand à l'AE (m ³ /ha)	Diamètre quadratique à l'AE (cm)	Écart entre les deux modèles (Nouveau - BFEC)		
						AE (ans)	Volume marchand (m ³ /ha)	Diamètre quadratique (cm)
1 600	7	Nouveau	96	296	22,4			
	9	BFEC	56	239	32,0	20	72	-9,1
		Nouveau	76	311	22,9			
	11	BFEC	51	248	31,0	12	80	-7,7
		Nouveau	63	328	23,3			
	13	BFEC	51	296	34,0	2	47	-10,4
Nouveau		53	343	23,6				
15	BFEC	46	307	34,0	-2	42	-10,6	
	Nouveau	44	349	23,4				
2 000	7	Nouveau	96	299	20,3			
	9	BFEC	51	217	27,0	26	104	-6,1
		Nouveau	77	321	20,9			
	11	BFEC	51	253	30,0	12	83	-8,7
		Nouveau	63	336	21,3			
	13	BFEC	51	304	32,0	1	43	-10,6
Nouveau		52	347	21,4				
15	BFEC	46	315	32,0	-3	40	-10,7	
	Nouveau	43	355	21,3				
2 500	7	Nouveau	98	306	18,6			
	9	Nouveau	78	327	19,1			
	11	Nouveau	63	340	19,3			
	13	Nouveau	52	353	19,5			
	15	Nouveau	43	363	19,5			

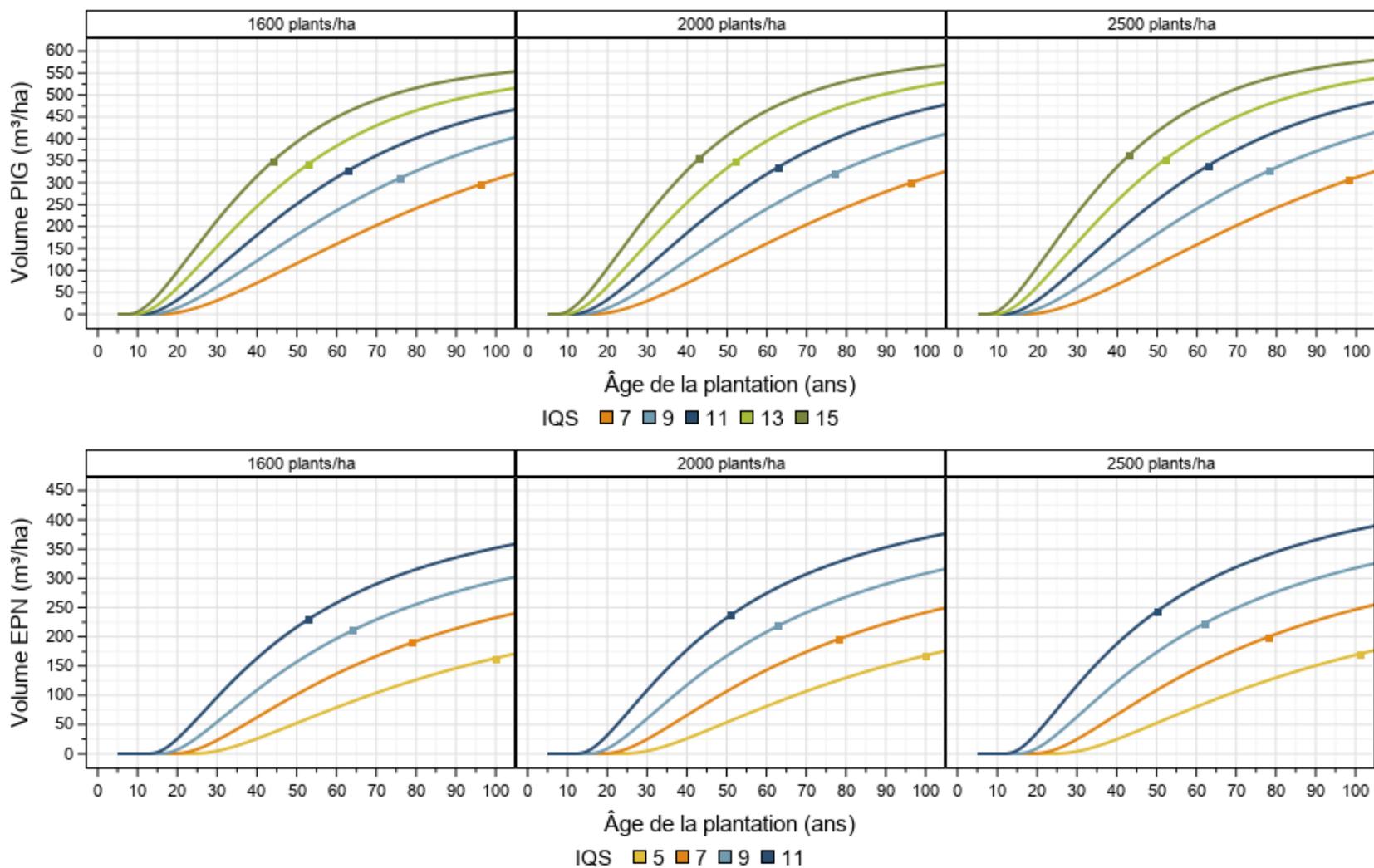


Figure 6. Courbes du rendement estimé en volume marchand pour le pin gris (PIG, rangée de graphiques du haut) et l'épinette noire (EPN, rangée de graphiques du bas), pour différentes densités de reboisement et selon l'indice de qualité de station (IQS). Les points correspondent au volume marchand à l'âge d'exploitabilité.

Pour les plantations d'épinette noire, les âges d'exploitabilité estimés avec les nouvelles courbes de rendement varient de 100 ans pour un IQS de 5 m à 51 ans pour un IQS de 11 m (tableau 8, densité de reboisement : 2 000 plants/ha). Ils sont plus grands que ceux estimés avec les courbes du BFEC. L'écart diminue avec l'IQS; par exemple, pour une densité de reboisement de 2 000 plants/ha, il passe de 17 ans pour un IQS de 7 m à 5 ans pour un IQS de 11 m (tableau 8). Cependant, le volume marchand à l'âge d'exploitabilité est plus grand avec les nouvelles courbes (écarts de 50 à 21 m³/ha pour un IQS de 7 à 11 m et une densité de 2 000 plants/ha), tandis que le diamètre moyen quadratique est semblable (tableau 8, densité de 2 000 plants/ha).

Tableau 8. Âge d'exploitabilité (AE), volume marchand et diamètre moyen quadratique marchand à l'âge d'exploitabilité obtenus avec les nouvelles courbes de rendement et avec celles du BFEC, pour l'épinette noire. L'écart entre les deux modèles est aussi présenté.

Densité de reboisement (n ^{bre} de plants/ha)	Classe d'IQS (m)	Modèle	AE (ans)	Volume marchand à l'AE (m ³ /ha)	Diamètre quadratique à l'AE (cm)	Écart entre les deux modèles (Nouveau - BFEC)		
						AE (ans)	Volume marchand (m ³ /ha)	Diamètre quadratique (cm)
1 600	5	Nouveau	100	163	19,0			
	7	BFEC	61	139	16,0	18	51	4,5
		Nouveau	79	190	20,5			
	9	BFEC	51	184	20,0	13	27	1,5
		Nouveau	64	211	21,5			
	11	BFEC	46	213	23,0	7	17	-0,7
Nouveau		53	230	22,3				
2 000	5	Nouveau	100	168	17,6			
	7	BFEC	61	145	17,0	17	50	1,9
		Nouveau	78	195	18,9			
	9	BFEC	51	186	19,0	12	33	0,8
		Nouveau	63	219	19,8			
	11	BFEC	46	216	21,0	5	21	-0,5
Nouveau		51	237	20,5				
2 500	5	Nouveau	101	171	16,2			
	7	Nouveau	78	199	17,4			
	9	Nouveau	62	223	18,2			
	11	Nouveau	50	243	18,8			

Discussion

Nous avons comparé les nouvelles courbes de rendement à celles utilisées par le BFEC, de même que les âges d'exploitabilité obtenus à partir de ces courbes. Nous tenons toutefois à rappeler que ces comparaisons comprennent une certaine imprécision induite par l'approximation de l'âge de plantation à partir de l'âge total et de la transformation des IQS. Ces comparaisons ne sont donc présentées qu'à titre indicatif.

Les plantations utilisées dans Bolghari et Bertrand (1984) et Prégent *et al.* (1996) étaient jeunes (âge total maximal de 31 ans pour le pin gris et de 36 ans pour l'épinette noire). De plus, les équations utilisées par

ces auteurs pour estimer la surface terrière totale, le diamètre moyen quadratique et le volume étaient linéaires, et ne permettaient aucune extrapolation. Le BFEC avait donc développé une approche pour extrapoler les courbes de rendement (Poulin 2013). Celle-ci consistait à faire une régression avec les prévisions obtenues avec les modèles publiés (Bolghari et Bertrand 1984, Prégent *et al.* 1996) pour la période couvrant les âges observés, et avec des valeurs cibles tirées du *Manuel d'aménagement forestier* pour les âges supérieurs à l'âge maximal observé (MRN 1998, cité dans Poulin 2013).

Les nouvelles courbes de rendement présentées ici sont développées à partir de plantations âgées jusqu'à 59 ans pour le pin gris et 55 ans pour l'épinette noire. Elles sont issues d'un modèle dynamique dont l'extrapolation est mieux contrôlée qu'avec les modèles de Bolghari et Bertrand (1984) et Prégent *et al.* (1996). De plus, nous avons vérifié les rendements estimés de 60 à 100 ans avec des sources externes. Il est donc possible d'utiliser les nouvelles courbes jusqu'à 100 ans sans avoir à les modifier. Ainsi, les modèles ont une portée au-delà de l'âge d'exploitabilité, sans toutefois se rendre jusqu'à la sénescence. Puisque nous ne disposons pas de données pour vérifier le comportement des modèles à très long terme, nous recommandons de limiter leur utilisation à un âge de plantation maximal de 100 ans.

Rappelons que les modèles sont développés à partir d'observations de plantations sans éclaircie commerciale, dont la densité demeure forte. De plus, toutes les plantations sélectionnées étaient qualifiées de réussies, puisque l'essence plantée occupait presque entièrement l'étage dominant. D'autres travaux seront nécessaires pour estimer le rendement des plantations après une éclaircie commerciale et celui des plantations envahies par des espèces concurrentes.

Conclusion et recommandations

Le présent travail a permis de produire de nouveaux modèles de croissance pour les plantations monospécifiques de pin gris et d'épinette noire au Québec. Ces nouveaux modèles prévoient les différents attributs dendrométriques des plantations en fonction de l'IQS et de la densité de reboisement. Les données ayant servi à développer les nouveaux modèles proviennent de placettes plus nombreuses et qui ont été suivies plus longtemps que pour les modèles précédents. De fait, les nouvelles courbes de rendement s'appuient sur des plantations âgées jusqu'à 59 ans pour le pin gris et 55 ans pour l'épinette noire.

Les nouvelles courbes de rendement utilisent un modèle dynamique dont l'extrapolation est mieux contrôlée que pour les modèles précédents. De plus, nous avons vérifié leur comportement à long terme. Il est donc possible de les utiliser jusqu'à un âge de plantation de 100 ans, mais nous ne recommandons pas de les utiliser au-delà de cet âge. Le mesurage de vieilles plantations serait nécessaire pour mieux évaluer le comportement à long terme des nouvelles courbes de rendement.

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Service du soutien scientifique

Charles Ward, ing.f., M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Références

- Amateis, R. L., H. E. Burkhart et T. E. Burk, 1986. *A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned pine plantations*. For. Sci. 32(2): 277-296. <https://doi.org/10.1093/forestscience/32.2.287>
- Bolghari, H.A. et V. Bertrand, 1984. *Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche (Terres et Forêts). Mémoire de recherche forestière n° 79. 392 p.
www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire79.pdf
- Castedo-Dorado, F., U. Diéguez-Aranda et J. G. Álvarez-González, 2007. *A growth model for Pinus radiata D. Don stands in north-western Spain*. Ann. For. Sci. 64(4): 453-465. <https://doi.org/10.1051/forest:2007023>
- Coble, D. W., 2009. *A new whole-stand model for unmanaged loblolly and slash pine plantations in east Texas*. South. J. Appl. For. 33(2) : 69-76. <https://doi.org/10.1093/sjaf/33.2.69>
- Diéguez-Aranda, U., H.E. Burkhart et R.L. Amateis, 2006. *Dynamic site model for Loblolly pine (Pinus taeda L.) plantations in the United States*. For. Sci. 52: 262-272. <https://doi.org/10.1093/forestscience/52.3.262>
- Lenhart, J.D., 1996. *Total and partial stand-level yield prediction for loblolly and slash pine plantations in East Texas*. South. J. Applid. For. 20: 36-41.
- Poulin, J., 2013. *Création des courbes d'évolution. Calcul des possibilités forestières 2013-2018*. Bureau du forestier en chef, Roberval, Québec, 53 p. https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2012/12/BFEC_CreationCourbes.pdf
- Prégent, G., V. Bertrand et L. Charette, 1996. *Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 118. 70 p. www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire118.pdf
- Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2010. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 160. 73 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire160.pdf>

Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2016. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette de Norvège au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 176. 95 p.

<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire176.pdf>

Zhao, D., B. Borders, M. Wang et M. Kane, 2007. *Modeling mortality of second-rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southern United States*. For. Ecol. Manage. 252 (1) : 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.030>

Annexe 1. Équations composant le modèle dynamique de croissance des plantations de pin gris et d'épinette noire.

Équation(s)	Numéro(s)
$HD_{2,EPN} = \frac{\beta_{0,EPN}}{1 - \left(1 - \frac{\beta_{0,EPN}}{HD_1}\right) \left(\frac{Age_1}{Age_2}\right)^{\beta_{2,EPN}}}$ $HD_{2,PIG} = \beta_{0,PIG} - \beta_{0,PIG} \left(1 - \frac{HD_1}{\beta_{0,PIG}}\right)^{(Age_2/Age_1)^{\beta_{2,PIG}}}$	[1] et [2]
$N_{0,2} = N_{0,1} e^{\alpha \cdot IQS(Age_2 - Age_1)}$	[3]
$G_{0,1} = e^{X_{0,1}} \cdot e^{[-(-c_2 + c_3/X_{0,1}) \cdot (Age_1)^{-c_1}]}$	où $X_{0,1} = b_1 \cdot IQS^{b_2} - \frac{b_3}{N_{0,1}}$ [4]
$G_{0,2} = e^{X_{0,2}} \cdot e^{[-(-c_2 + c_3/X_{0,1}) \cdot (Age_2)^{-c_1}]}$	où $X_{0,2} = 0.5 \cdot Age_1^{-c_1} \cdot \left\{ -c_2 + Age_1^{c_1} \cdot \ln(G_{0,1}) + \sqrt{4 \cdot c_3 \cdot Age_1^{c_1} + [c_2 - Age_1^{c_1} \cdot \ln(G_{0,1})]^2} \right\}$ [5]
$V_{0,2} = \exp\left(a_0 + a_1 \ln(HD_2) + a_2 \frac{1}{Age_2} + a_3 \ln(G_{0,2})\right)$	[6]
$DHP_{0,2} = \sqrt{\frac{40000 \cdot G_{0,2}}{\pi \cdot N_{0,2}}}$	[7]
$N_{9,2} = N_{0,2} e^{d_{n,1}(9,0/DHP_{0,2})^{d_{n,2}}}$	$G_{9,2} = G_{0,2} e^{d_{g,1}(9,0/DHP_{0,2})^{d_{g,2}}}$ $V_{9,2} = V_{0,2} e^{d_{v,1}(9,0/DHP_{0,2})^{d_{v,2}}}$ [8], [9] et [10]
$DHP_{9,2} = \sqrt{\frac{40000 \cdot G_{9,2}}{\pi \cdot N_{9,2}}}$	[11]

Tableau A1.1 Valeurs des paramètres des équations du modèle pour les plantations de pin gris.

Équation	Paramètre	Valeur du paramètre	Erreur type du paramètre	Valeur de t	Valeur de p
HD_2	β_0	26,5930	0,6621	40,2	<0,001
	β_2	1,2178	0,0148	82,3	<0,001
$N_{0,2}$	α	-0,00102	0,00002	-42,7	<0,001
$G_{0,1}$	b_1	3,3375	0,0111	300,9	<0,001
	b_2	0,0627	0,0012	51,2	<0,001
	b_3	120,9	4,9	24,6	<0,001
$G_{0,2}$	c_1	1,2883	0,0330	39,0	<0,001
	c_2	882,9	210,0	4,2	<0,001
	c_3	3558,0	813,5	4,4	<0,001
$V_{0,2}$	a_0	-1,6823	0,1037	-16,2	<0,001
	a_1	1,3396	0,0237	56,5	<0,001
	a_2	2,0710	0,6702	3,1	0,002
	a_3	0,9554	0,0132	72,6	<0,001
$V_{9,2}$	$d_{v,1}$	-0,8663	0,0057	-150,9	<0,001
	$d_{v,2}$	3,3898	0,0260	130,3	<0,001
$G_{9,2}$	$d_{g,1}$	-0,3717	0,0034	-110,2	<0,001
	$d_{g,2}$	6,8363	0,0499	137,0	<0,001
$N_{9,2}$	$d_{n,1}$	-0,6822	0,0052	-130,8	<0,001
	$d_{n,2}$	5,5394	0,0397	139,6	<0,001

Tableau A1.2. Valeurs des paramètres des équations du modèle pour les plantations d'épinette noire.

Équation	Paramètre	Valeur du paramètre	Erreur type du paramètre	Valeur de t	Valeur de p
HD_2	β_0	24,6300	0,7426	33,2	<0,001
	β_2	1,5481	0,0166	93,5	<0,001
$N_{0,2}$	α	-0,00085	0,00006	-15,3	<0,001
$G_{0,1}$	b_1	3,2436	0,0241	134,5	<0,001
	b_2	0,1064	0,0031	34,6	<0,001
	b_3	272,6	10,9	25,1	<0,001
$G_{0,2}$	c_1	1,4835	0,0268	55,4	<0,001
	c_2	1478,4	350,6	4,2	<0,001
	c_3	6408,8	1418,1	4,5	<0,001
$V_{0,2}$	a_0	-0,7630	0,0336	-22,7	<0,001
	a_1	0,9225	0,0125	73,9	<0,001
	a_2	-0,2620	0,2893	-0,9	0,365
	a_3	0,9897	0,0058	169,7	<0,001
$V_{9,2}$	$d_{v,1}$	-0,8715	0,0045	-194,0	<0,001
	$d_{v,2}$	3,0687	0,0137	224,8	<0,001
$G_{9,2}$	$d_{g,1}$	-0,3956	0,0044	-91,0	<0,001
	$d_{g,2}$	6,2347	0,0636	98,0	<0,001
$N_{9,2}$	$d_{n,1}$	-0,7339	0,0068	-108,4	<0,001
	$d_{n,2}$	4,7799	0,0458	104,4	<0,001

Annexe 2. Comment utiliser le modèle de l'annexe 1 pour générer des courbes de rendement.

À partir de l'âge $t = 1$ an, par pas de 1 an pour un IQS donné et une densité de reboisement donnée :

1. Estimer la croissance en hauteur dominante HD_2 avec l'équation 1 ou 2, avec $Age_1 = 25$, $HD_1 = IQS$, et $Age_2 = t$.
2. Estimer le nombre d'arbres vivants $N_{0,2}$ avec l'équation 3 de $Age_1 = t$ à $Age_2 = t + 1$, pour l'IQS donné. À $t = 1$ an, $N_{0,1} =$ densité de reboisement. Pour $t > 1$, $N_{0,1}$ est la valeur de $N_{0,2}$ à $t - 1$.
3. Estimer la surface terrière $G_{0,1}$ à $Age_1 = t$ avec l'équation 4, à partir de la densité de reboisement et de l'IQS. Pour $t = 2$ à $t = 15$, utiliser le nombre d'arbres estimé par l'équation 3 à $t - 1$, au lieu de la densité de reboisement. Pour $t > 15$, ne plus faire l'étape 3, aller directement à l'étape 4.
4. Estimer la croissance en surface terrière $G_{0,2}$ avec l'équation 5, de $Age_1 = t$ à $Age_2 = t + 1$, à partir de $G_{0,1}$ pour $t = 1$ à $t = 15$, et à partir de $G_{0,2}$ à $t - 1$ pour $t > 15$.
5. Estimer le volume total $V_{0,2}$ avec l'équation 6 à partir de $G_{0,2}$, HD_2 et $Age_2 = t + 1$.
6. Estimer le diamètre moyen quadratique $DHP_{0,2}$ avec l'équation 7 à partir de $G_{0,2}$ et $N_{0,2}$.
7. Estimer les caractéristiques marchandes avec les équations 8 à 11.
8. Répéter les étapes 1 à 7 par pas de 1 an jusqu'à $t =$ âge maximal désiré.