

Modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche au Québec

Daniel Mailly

Résumé

L'objet de cette étude était de mettre au point des modèles de croissance internodale variable pour l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) au Québec. Ces modèles sont très utiles en foresterie car ils permettent d'estimer avec précision l'indice de qualité de station (IQS) des jeunes peuplements forestiers. La mise au point de ces modèles s'est avérée nécessaire en raison de la valeur commerciale de cette essence et du fait qu'ils peuvent servir d'intrants à des prescriptions sylvicoles et aux calculs de la possibilité forestière impliquant de jeunes peuplements. Au total, 56 placettes d'analyse de tiges ont été utilisées pour l'ajustement des modèles. En tout, 50 modèles de croissance internodale variable, pour des âges allant de 1 à 50 ans (âge pris à une hauteur de 1,0 m ou 1,3 m), ont été ajustés selon l'approche méthodologique mise au point par Nigh (1997a). Les valeurs de racine carrée de l'erreur quadratique moyenne indiquent que les modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche sont relativement précis. La précision obtenue se compare très bien à celle de modèles similaires ajustés pour l'épinette blanche du nord-est de la Colombie-Britannique. Une validation provisoire a également démontré que les modèles sont non biaisés, et que l'erreur d'estimation moyenne de l'IQS était relativement faible et n'entraînait pas de répercussions pratiques sur le terrain.

Mots-clés : croissance internodale, épinette blanche, indice de qualité de station, modèle, régression non linéaire.

Abstract

*The objective of this study was to develop variable growth intercept models for white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss) in Quebec. Such models are very useful in forestry because they allow a precise estimation of site index in young forest stands. Their development was necessary because of the commercial value of white spruce and also because growth intercept models can serve as inputs for silvicultural prescriptions and for allowable cut calculations involving young stands. A total of 56 stem analysis plots were used to adjust the models. In all, 50 models were fitted using the method developed by Nigh (1997a), for ages 1 to 50 years, measured at heights of both 1.0 m and 1.3 m. Root mean square error values indicate that the growth intercept models for white spruce have a relatively good precision, which compares very well to that of similar models adjusted for white spruce in northeastern British Columbia. A preliminary validation also demonstrated that the models were not biased, and that the mean error estimate of site index was small, with no practical repercussions in the field.*

Keywords: models, non-linear regression, site index, variable growth intercept, white spruce.



Ministère des Ressources naturelles
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-7994
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : recherche.forestiery@mrn.gouv.qc.ca
Site Internet : www.mrn.gouv.qc.ca

Introduction

L'indice de qualité de station (IQS) est un concept largement répandu pour estimer la productivité des stations forestières (Skovsgaard et Vanclay 2008). Au Québec, cet indice a notamment été utilisé dans les travaux de Vézina et Linteau (1968), de Boudoux (1978) et de Pothier et Savard (1998). Il s'applique tout particulièrement aux peuplements forestiers âgés de 20 ans et plus (Nigh 1995) et n'ayant pas atteint un stade de développement suranné. Pour estimer de manière fiable l'IQS pour des jeunes peuplements, il est préférable d'utiliser les modèles de croissance internodale variable, qui ont les avantages suivants (Nigh 1996) : (i) ils sont conçus spécialement pour l'estimation de l'IQS et non de la hauteur; (ii) ils sont conçus spécifiquement pour les jeunes peuplements; (iii) ils ne sont pas contraints de prendre la valeur de l'IQS à l'âge correspondant à cet indice, comme le sont généralement les modèles hauteur-âge; (iv) ils sont moins influencés que les modèles hauteur-âge par de petites erreurs de mesure de la hauteur moyenne.

Au Québec, des modèles de croissance internodale variable sont disponibles pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) (Mailly et Gaudreault 2005). Leur mise au point s'est avérée nécessaire en raison de l'importance commerciale de ces essences pour l'approvisionnement en bois et pour qu'ils puissent servir d'intrants à des prescriptions sylvicoles et aux calculs de la possibilité forestière. En dehors du Québec, plusieurs modèles de croissance internodale variable sont disponibles, notamment en Colombie-Britannique, pour les épinettes de la zone intérieure (*Picea glauca* [Moench] Voss, *Picea engelmannii* Parry ex Engelm. et *Picea glauca* x *engelmannii*; Nigh 1996, 1999), le Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] var. *Franco menziesii*; Nigh 1997a), le pin tordu latifolié (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm.; Nigh 1997b), le Douglas bleu (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* [Beissn.] Franco; Nigh 1997c), la pruche de l'Ouest de la zone intérieure (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.; Nigh 1998), la pruche de l'Ouest de la zone côtière (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.; Nigh 1999), l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière; Nigh 1999), le mélèze de l'Ouest (*Larix occidentalis* Nutt.; Nigh et al. 1999), le thuya géant (*Thuja plicata* Donn ex D. Don; Nigh 2000), l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.; Nigh et Klinka 2001), le pin ponderosa (*Pinus ponderosa* P. Laws. ex C. Laws; Nigh 2002) et le sapin gracieux (*Abies*

amabilis Dougl. ex Forbes; Nigh 2009). En Ontario, des modèles de croissance internodale variable sont disponibles pour les plantations et peuplements naturels de pin gris (Guo et Wang 2006) et pour les plantations d'épinette noire du nord de la province (Kwiaton et al. 2011).

En ce qui concerne l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), les premiers efforts d'élaboration de modèles de croissance internodale ont été entrepris par Thrower (1987, repris par Carmean et al. en 2006) avec la méthode internodale conventionnelle. Ces modèles reposent sur la mesure de hauteur des verticilles (3, 4 ou 5) situés au-dessus d'une hauteur de 2,0 m et servent à estimer l'IQS à 15 ans des plantations situées dans le centre-nord de l'Ontario. Huang (1996) a utilisé une approche similaire pour des peuplements forestiers naturels du nord de l'Alberta dominés par l'épinette blanche. Les modèles ainsi produits permettent de déterminer l'IQS à 50 ans à partir de mesures de hauteur de verticilles (3, 4 ou 5) situés au-delà d'une hauteur de 1,3 m. Toujours en Alberta, Kalischuk et al. (2006) ont relié l'IQS à la croissance internodale moyenne pour des peuplements mélangés d'épinette blanche et de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.). Enfin, des modèles de croissance internodale variable ont été élaborés par Nigh (2004) à partir de 18 placettes d'échantillonnage; ils ont été conçus spécifiquement pour la zone biogéoclimatique de l'épinette blanche et de l'épinette noire (BC Ministry of Forests 1998) située au nord-est de la Colombie-Britannique.

L'objet de cette étude était de mettre au point des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche applicables aux conditions de croissance qui prévalent au Québec. L'étude avait également pour objectif d'effectuer une validation provisoire des modèles à partir de données indépendantes et de comparer les résultats obtenus avec ceux déjà publiés pour l'épinette blanche dans le nord-est de la Colombie-Britannique avec la méthode de croissance internodale variable (Nigh 2004).

1. Matériel et méthodes

1.1. Collecte des données

Les données de cette étude ont été obtenues par l'échantillonnage de 56 placettes d'épinette blanche couvrant l'aire de répartition provinciale de cette espèce (Figure 1), dans 5 domaines bioclimatiques : l'érablière à tilleul, l'érablière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau blanc et

la pessière à mousses. Elles ont été remesurées ou établies conformément aux procédures recommandées pour les placettes d'échantillonnage permanentes du Québec (MRNF 2012). Les caractéristiques géographiques et dendrométriques des placettes échantillonnées sont présentées au tableau 1.

Les placettes étaient circulaires, d'une taille de 0,04 ha, et situées dans des secteurs écologiquement homogènes où l'épinette blanche représentait au moins 25 % de la surface terrière marchande du peuplement. Lors de l'établissement d'une placette, les épinettes blanches ayant les 3 plus grands diamètres (diamètre mesuré à 130 cm de hauteur, D_{130} , Brokaw et Thompson 2000) ont été choisies comme arbres échantillons pour un abattage subséquent. Lors du remesurage d'une placette d'échantillonnage permanente du réseau de la Direction des inventaires forestiers (ministère des Ressources naturelles), les arbres ont été sélectionnés à l'extérieur de la placette; ils devaient alors être situés à une distance minimale équivalant à la hauteur de l'arbre dominant et avoir des diamètres (D_{130}) semblables à ceux des 3 plus gros arbres de la placette.

Avant d'abattre un arbre, une carotte a été prélevée à 0,75 m de hauteur pour vérifier si l'arbre avait subi une période de ralentissement de croissance juvénile. Le cas échéant, un arbre dominant de diamètre (D_{130}) comparable, mais n'ayant subi aucun ralentissement de croissance, était sélectionné en guise de remplacement. Les arbres sélectionnés ont été abattus et des sections de tige ont été prélevées à hauteur de souche (0,15 m), à 0,60 m, à 1 m, à 1,30 m, à 2 m, puis à tous les 1 ou 2 m de distance. Le logiciel WINDENDRO^{MC} (Guay *et al.* 1992) a été utilisé pour mesurer les accroissements annuels en diamètre, et le logiciel COFECHA (Holmes 1983) a servi à l'interdatation des sections de tige. Les données des sections ont ensuite été converties en couples de données hauteur-âge par interpolation linéaire avec le logiciel ANATI (Tardif 2001) et analysées en utilisant le progiciel SAS 9.3 (SAS Institute Inc. 2011).

1.2. Modélisation de la croissance internodale

La méthode utilisée pour l'analyse des données est identique à celle utilisée par Mailly et Gaudreault (2005), qui s'inspire largement de celle mise au point

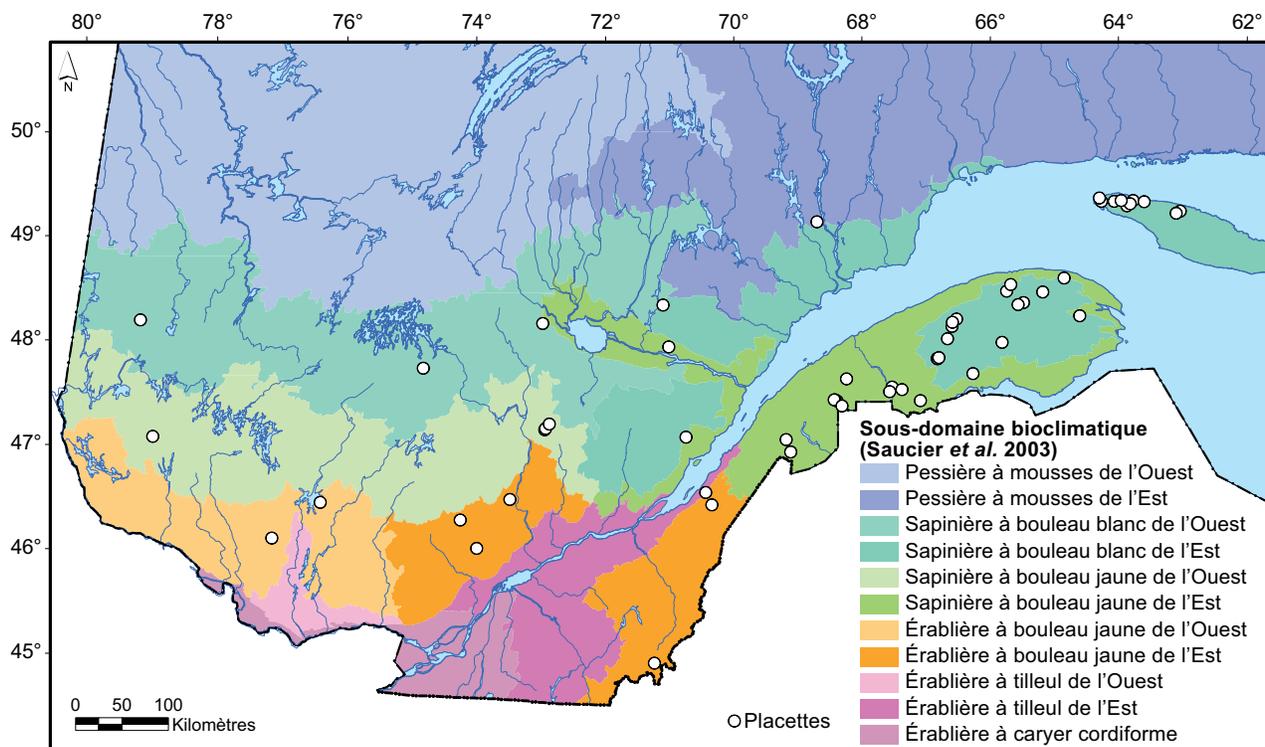


Figure 1. Carte de l'emplacement des placettes d'échantillonnage dans la province de Québec.

Tableau 1. Données récapitulatives sur les placettes d'échantillonnage permanentes utilisées dans l'étude.

n°	Type écologique	Densité (tiges marchandes à l'ha)	Surface terrière marchande (ST, m ² ·ha ⁻¹)	% ST en EPB	Hauteur dominante (m)	Âge à 1,0 m (années)	Âge à 1,3 m (années)	IQS (âge à 1,0 m)*	IQS (âge à 1,3 m)*
<i>Sous-domaine de l'érablière à tilleul de l'Est</i>									
1	MJ16	1 100	36,9	25,1	20,4	83	82	13,5	13,8
<i>Sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'Est</i>									
2	MS20P	825	24,1	70,7	19,0	63	62	15,8	16,2
3	MJ22	1 200	42,7	53,3	23,2	63	62	19,2	19,4
4	MJ12	1 225	35,6	30,2	22,9	87	85	13,9	14,2
5	MJ22	1 150	36,6	47,9	22,7	53	52	22,2	22,4
6	MJ25	725	34,3	51,7	30,7	93	92	20,4	20,7
<i>Sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest</i>									
7	MJ21	375	23,0	29,9	20,5	66	62	15,3	16,3
8	MJ12	925	30,9	40,1	18,9	91	87	10,1	10,3
<i>Sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est</i>									
9	MS23	1 550	39,3	60,8	18,4	51	50	18,4	18,6
10	MS16	1 375	51,7	80,5	16,4	76	72	10,1	10,9
11	MS23	1 725	42,1	45,8	18,9	54	53	18,0	18,1
12	MS22	1 000	33,5	33,6	19,7	63	63	16,5	16,6
13	MS20	1 050	47,7	72,0	25,8	65	64	22,0	22,3
14	MS20	1 200	41,6	62,4	21,8	67	66	17,3	17,4
15	MS22	1 350	35,9	48,1	18,6	55	54	17,2	17,3
16	MS22	1 050	42,3	63,7	21,9	64	62	17,8	17,9
17	MS22	850	30,2	53,6	20,3	68	67	15,9	16,1
18	MS23	1 700	41,1	32,9	19,0	57	56	17,5	17,6
19	MS22	2 050	46,9	41,3	18,4	54	53	17,7	17,7
20	MS62	1 025	24,5	38,6	18,3	65	63	16,0	16,2
21	MS13	1 175	39,7	64,8	19,9	61	60	16,7	16,7
22	MS22	1 200	29,2	78,2	18,9	72	71	15,7	15,8
<i>Sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest</i>									
23	RE22	850	34,3	28,7	24,6	86	84	19,3	19,5
24	RS22	1 225	33,4	69,5	23,7	70	69	20,1	20,1
25	RS22	525	26,3	43,3	24,9	86	85	19,0	19,2
26	MS22	900	26,1	50,2	20,4	65	64	17,7	17,9
<i>Sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'Est</i>									
27	MS24	1 200	47,1	82,7	19,9	68	66	14,9	15,4
28	MS24	1 400	34,9	63,0	16,5	55	54	14,9	14,9
29	RB53	1 350	32,0	100,0	16,5	62	61	13,6	13,7
30	RB53	1 200	50,0	97,5	18,4	65	64	14,7	14,9
31	RB53	2 375	48,1	91,6	14,6	72	71	10,6	10,7
32	RB51	1 800	44,4	100,0	15,4	80	79	11,2	11,3
33	MS22	2 625	49,4	45,8	15,4	70	69	12,1	12,1
34	MS22	2 500	47,4	36,7	15,0	61	60	12,4	12,6
35	MS21	1 175	31,8	48,0	17,2	61	59	14,3	14,6
36	MS22	1 150	44,1	35,3	18,5	76	74	14,1	14,2
37	MS23	725	34,0	80,4	22,2	85	83	14,9	15,1
38	MS23	700	39,3	77,8	22,8	77	74	16,6	16,7
39	RS22	1 075	35,6	49,4	20,6	76	74	14,6	14,8

* L'IQS a été calculé en prenant la moyenne des hauteurs (en m) des arbres-études retenus dans chaque placette à l'âge de 50 ans.

Tableau 1. (suite et fin)

n°	Type écologique	Densité (tiges marchandes à l'ha)	Surface terrière marchande (ST, m ² ·ha ⁻¹)	% ST en EPB	Hauteur dominante (m)	Âge à 1,0 m (années)	Âge à 1,3 m (années)	IQS (âge à 1,0 m)	IQS (âge à 1,3 m)
<i>Sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'Est (suite)</i>									
40	MS23	1 075	41,0	50,6	19,0	70	68	14,2	14,6
41	MS23	1 875	35,4	27,2	15,5	69	67	11,9	12,1
42	MS13	1 650	41,2	36,1	20,2	64	60	15,7	16,4
43	MS23	1 125	45,8	56,3	18,9	75	73	14,2	14,5
44	MS13	1 325	46,0	33,9	23,6	60	58	20,8	21,0
45	MS23	1 950	36,4	29,5	16,2	57	55	14,6	15,1
46	MS23	3 700	48,3	31,6	13,4	71	69	10,3	10,5
47	RB53	825	46,6	53,1	17,6	72	71	13,3	13,6
48	RB53	2 150	51,9	74,7	14,9	57	55	13,3	13,8
49	RB52	1 525	52,2	46,3	15,6	51	49	15,6	15,8
50	RB53	1 525	43,7	97,3	15,3	80	78	10,1	10,3
51	RB53	1 075	47,5	80,5	18,6	82	81	13,7	13,9
52	RB53	1 000	42,0	43,3	15,8	72	69	11,2	11,7
<i>Sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'Ouest</i>									
53	MS23	1 575	37,2	56,0	19,9	59	58	18,3	18,5
54	MS22	1 400	36,2	34,5	19,2	57	54	17,5	18,1
55	MS22	1 300	37,2	30,6	20,1	57	56	18,9	19,2
<i>Sous-domaine de la pessière à mousses de l'Est</i>									
56	MS22	1 525	32,5	33,3	18,3	68	66	13,1	13,7

par Nigh (1997a). La principale différence consiste en l'utilisation d'une hauteur de référence de 1,0 m, qui est la norme au Québec pour déterminer l'âge des arbres échantillons, en plus de la hauteur de référence de 1,3 m, généralement utilisée dans les autres provinces canadiennes et ailleurs dans le monde. L'étude présente donc 2 ensembles d'équations de croissance internodale. Afin d'améliorer la clarté du texte, l'âge mesuré à 1,0 m (100 cm) a été désigné par « âge₁₀₀ » et l'âge mesuré à 1,3 m (130 cm), par « âge₁₃₀ ».

Les couples de données hauteur-âge ont été reliés graphiquement pour chaque arbre et chaque placette. Les données s'étendant au-delà de 50 ans ont été exclues puisqu'elles n'étaient pas nécessaires pour l'analyse. Les arbres présentant une croissance anormale ont également été écartés de l'analyse, de même que les placettes qui comptaient moins de 2 arbres convenables (Nigh et Love 1999). De façon générale, les arbres rejetés étaient ceux ayant été incapables de maintenir une croissance en hauteur constante (typique des arbres dominants) ou ceux ayant souffert d'une décroissance marquée à cause de l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de

l'épinette. De plus, les hauteurs de 4 arbres âgés de 45 à 50 ans ont été extrapolées en utilisant le modèle de Chapman-Richards (Fekedulegn *et al.* 1999) sur la base des 10 dernières années de croissance.

La croissance en hauteur moyenne a ensuite été calculée pour chaque placette. L'IQS correspondait à la hauteur moyenne dominante atteinte à 50 ans, à 1,0 ou à 1,3 m. La croissance internodale a finalement été calculée d'après l'équation 1, pour chaque âge₁₀₀ et âge₁₃₀ de 1 à 50 ans :

$$CI_A = \frac{H_A - HR}{A - A_0} \cdot 100 \quad [1]$$

où

CI_A représente la croissance internodale (cm/an) pour l'âge (A) = 1, 2, ..., 50 (ans),

H_A est la hauteur moyenne (m) à l'âge A ,

HR est la hauteur de référence pour la lecture de l'âge (1,0 ou 1,3 m), et

A_0 est un facteur d'ajustement de l'âge qui permet de tenir compte du fait que la première année de croissance en hauteur au-dessus de la hauteur de référence est généralement incomplète; ce facteur est défini par

$$A_0 = \frac{HR - H_0}{H_1 - H_0} \quad [2]$$

où H_0 et H_1 sont les hauteurs de l'arbre situées immédiatement au-dessous et au-dessus de la hauteur de référence.

Les croissances internodales de toutes les placettes ont été reliées à l'IQS pour chaque âge₁₀₀ et âge₁₃₀, selon le modèle de croissance internodale variable de Nigh (1997a) :

$$IQS = HR + e^{b_1} \cdot CI_A^{b_2} \quad [3]$$

où

IQS est l'indice de qualité de station,

CI_A est la croissance internodale (cm/an) pour l'âge A à la hauteur de référence (HR),

e est la constante mathématique de Néper, dont la valeur est d'environ 2,71828, et

b_1 et b_2 sont les paramètres du modèle.

Un ensemble de paramètres a été estimé pour chaque âge₁₀₀ et âge₁₃₀ de 1 à 50 ans selon la procédure N_{LIN} de SAS. Une analyse des résidus a été effectuée pour confirmer les hypothèses de régression de non-biais, de normalité et d'homoscédasticité (Ratkowski 1983, Sen et Srivastava 1990). Chaque modèle a été soumis à l'analyse pour le biais (un test de t pour vérifier si la moyenne des résidus était significativement différente de 0), la normalité avec la statistique W (Shapiro et Wilk 1965), l'homoscédasticité avec la statistique F_k (Endrenyi et Kwong 1981), la non-linéarité des effets intrinsèques et paramétriques (Bates et Watts 1980) et les biais de paramètres (Box 1971).

1.3. Validation provisoire des modèles

Des données indépendantes ont été utilisées pour évaluer les modèles de croissance internodale. Ces données ont été récoltées pour la mise au point de

nouvelles courbes hauteur-âge par type écologique (Lafleche *et al.* 2013), mais conviennent aussi pour une validation provisoire des modèles puisqu'elles ont été recueillies selon des procédures similaires. Parmi les placettes d'échantillonnage disponibles pour l'évaluation des modèles, 19 ont été retenues parce qu'elles répondaient aux mêmes critères de sélection que ceux utilisés pour la mise au point des modèles.

Pour valider les modèles de croissance internodale, l'IQS réel a tout d'abord été déterminé pour chaque placette indépendante; il correspondait à la hauteur moyenne atteinte à 50 ans. Ensuite, un IQS a été calculé pour les mêmes placettes et pour chaque âge de 1 à 50 ans, en utilisant les modèles de croissance internodale précédemment mis au point. Finalement, la moyenne des erreurs d'estimation (différence entre l'IQS réel et l'IQS calculé) a été calculée pour chaque âge, afin d'observer la variation survenue lors de l'estimation de l'IQS avec les modèles (Nigh et Martin 2001). Pour un âge donné, une erreur supérieure à 0 indique que le modèle sous-estime l'IQS.

1.4. Comparaison avec les modèles de la Colombie-Britannique

Puisque des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche sont également disponibles en Colombie-Britannique (Nigh 2004), une comparaison a été effectuée avec ceux mis au point au Québec. Pour ce faire, les modèles de croissance internodale variable des 2 provinces ont été comparés graphiquement en prenant en compte l'étendue des croissances internodales observées au Québec par IQS pour les âges₁₃₀. Les données ayant servi à l'ajustement des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche en Colombie-Britannique proviennent de la zone biogéoclimatique de l'épinette blanche et de l'épinette noire (BC Ministry of Forests 1998) située au nord-est de cette province, du 54° au 60° degré de latitude Nord. Cette zone biogéoclimatique est caractérisée par un climat continental nordique avec de fréquents passages de masses d'air en provenance de l'Arctique, des hivers longs et très froids, et des saisons de croissance végétale courtes (DeLong *et al.* 1991). En tout, 18 placettes d'analyse de tiges (0,01 ha, 5,64 m de rayon) contenant un arbre dominant (étendue des IQS observés allant de 16,6 à 24,7 m à 50 ans, âge₁₃₀) ont été échantillonnées pour ajuster les modèles (Nigh 2004).

2. Résultats

Les tableaux 2 (âge₁₀₀) et 3 (âge₁₃₀) présentent les estimations paramétriques des modèles de croissance internodale pour les épinettes blanches âgées de 1 à 50 ans. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, qui est une mesure d'exactitude du modèle, y est également montrée. Les résultats des tests de biais, de normalité, d'homoscédasticité, de non-linéarité des effets intrinsèques et paramétriques et de biais paramétriques se résument ainsi :

- *Biais* : Aucun des modèles ne s'est avéré biaisé.
- *Normalité* : Les modèles pour l'âge₁₀₀ de 50 ans et pour les âges₁₃₀ de 43 à 45 ans ont montré un léger signe de non-normalité ($0,011 < p < 0,042$).
- *Homoscédasticité* : Le test F_k a indiqué un signe d'hétéroscédasticité pour le modèle concernant l'âge₁₃₀ de 50 ans, mais une analyse graphique a montré que la distribution des résidus était relativement satisfaisante.
- *Non-linéarité des effets intrinsèques et paramétriques* : Les mesures de non-linéarité ont indiqué que les modèles suivaient une trajectoire linéaire (Ratkowsky 1983).
- *Biais paramétriques* : Les biais paramétriques étaient inférieurs à 1 %, sauf pour les âges₁₀₀ de 23 à 25 ans et pour les âges₁₃₀ de 22 à 23 ans.

Les tests de biais, de normalité et d'homoscédasticité ont montré que les hypothèses de régression des moindres carrés (Sen et Srivastava 1990) étaient généralement respectées de manière satisfaisante. La figure 2 présente de façon graphique les modèles de croissance internodale ajustés à 5, 10, 20, 30, 40 et 50 ans (âge₁₀₀) pour l'épinette blanche. La figure 3 présente les mêmes courbes sur la base d'un âge mesuré à 1,3 m. Enfin, les tableaux 4 (âge₁₀₀) et 5 (âge₁₃₀) montrent l'application des modèles à partir des données âge-hauteur pour l'estimation de l'IQS.

La figure 4 montre l'erreur d'estimation moyenne (ligne pointillée) ainsi que l'intervalle de confiance de la moyenne à un niveau de 95 % (lignes brisées) obtenus après la validation des modèles de croissance internodale pour les âges de 1 à 50 ans. Un biais potentiel dans l'estimation de l'IQS est normalement observé lorsque les 2 limites de l'intervalle de confiance sont supérieures ou inférieures à 0 (c'est-à-dire qu'elles se retrouvent du même côté de la ligne 0 de l'erreur moyenne). La validation des modèles pour

l'épinette blanche a révélé que les modèles étaient non biaisés pour tous les âges₁₀₀ et tous les âges₁₃₀. En moyenne, l'erreur se situait autour de ± 20 cm pour les 2 hauteurs de référence.

La comparaison des modèles de croissance internodale variable du Québec avec ceux de la Colombie-Britannique montre une différence notable entre les courbes des 2 provinces, pour les âges₁₃₀ allant de 5 à 30 ans (Figure 5). Les courbes des modèles de la Colombie-Britannique associent des valeurs d'IQS supérieures à celles des modèles du Québec pour une croissance internodale donnée, et ces écarts vont en augmentant à mesure que les valeurs de croissance internodale augmentent. Ainsi, pour une croissance internodale moyenne de 30 cm par année environ, les modèles de la Colombie-Britannique prévoient des IQS (m à 50 ans) supérieurs de 3,9 m (5 ans), 3,4 m (10 ans), 2,8 m (20 ans) et 1,8 m (30 ans) à ceux des modèles ajustés au Québec (Figure 5). Ces écarts ne sont toutefois que de 0,6 m à 40 ans et de 0,03 m à 50 ans, pour une croissance internodale moyenne de 30 cm par année.

3. Discussion

La présente étude a permis d'ajuster des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche à des hauteurs de référence de 1,0 m et de 1,3 m. Les modèles se sont avérés aussi précis que ceux du sapin baumier (Tableaux 2 et 3 dans Mailly et Gaudreault 2005) et que ceux conçus pour l'épinette blanche de la Colombie-Britannique (Tableau 2 dans Nigh 2004), sur la base des valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (cette étude, tableaux 2 et 3). Ils sont légèrement moins précis que ceux de l'épinette noire et du pin gris (Tableaux 2 et 3 dans Mailly et Gaudreault 2005), 2 essences qui, toutefois, n'atteignent que des hauteurs moyennes d'environ 20 m, comparativement à 25 m pour l'épinette blanche (Farrar 1996).

L'approche de modélisation de la croissance internodale variable proposée par Nigh (1997a) s'applique adéquatement à l'épinette blanche au Québec. L'équation utilisée a permis de produire des courbes bien ajustées aux données, ce qui est caractéristique de ce type de modèles (Figures 2 et 3 et Nigh 1999). La relation entre l'IQS et les longueurs de pousse annuelle (croissance internodale) est légèrement curviligne (Figures 2 et 3), surtout en bas âge, ce qui indique qu'une unité d'augmentation dans la taille de la pousse annuelle correspond à une

Tableau 2. Paramètres estimés (b_1 et b_2) des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche, et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), pour les âges de 1 à 50 ans à la hauteur de 1,0 m.

Âge à 1,0 m (années)	b_1	b_2	REQM
1	1,7054	0,3099	2,6081
2	1,5441	0,3543	2,5038
3	1,3858	0,3984	2,4513
4	1,2642	0,4328	2,3925
5	1,1855	0,4544	2,3531
6	1,1415	0,4656	2,3235
7	1,0920	0,4786	2,2790
8	1,0366	0,4936	2,2413
9	0,9939	0,5047	2,2095
10	0,9531	0,5148	2,1688
11	0,9011	0,5280	2,1182
12	0,8528	0,5399	2,0687
13	0,7998	0,5532	2,0109
14	0,7370	0,5694	1,9437
15	0,6523	0,5919	1,8506
16	0,5696	0,6138	1,7587
17	0,4990	0,6329	1,7007
18	0,4166	0,6555	1,6409
19	0,3348	0,6780	1,5741
20	0,2520	0,7011	1,5035
21	0,1787	0,7216	1,4439
22	0,1191	0,7383	1,3967
23	0,0647	0,7536	1,3496
24	0,0173	0,7670	1,3006
25	-0,0223	0,7784	1,2689
26	-0,0583	0,7888	1,2488
27	-0,0911	0,7986	1,2257
28	-0,1260	0,8090	1,2110
29	-0,1574	0,8185	1,2071
30	-0,1791	0,8255	1,2037
31	-0,1929	0,8304	1,1988
32	-0,2140	0,8376	1,1949
33	-0,2465	0,8483	1,1830
34	-0,2853	0,8610	1,1588
35	-0,3339	0,8767	1,1221
36	-0,3895	0,8944	1,0728
37	-0,4514	0,9137	1,0160
38	-0,5115	0,9326	0,9550
39	-0,5634	0,9491	0,8874
40	-0,6034	0,9622	0,8151
41	-0,6316	0,9718	0,7420
42	-0,6502	0,9785	0,6689
43	-0,6651	0,9842	0,5953
44	-0,6783	0,9894	0,5209
45	-0,6898	0,9941	0,4444
46	-0,6976	0,9975	0,3632
47	-0,6958	0,9978	0,2735
48	-0,6914	0,9972	0,1828
49	-0,6947	0,9988	0,0996
50	-0,7063	1,0030	0,0343

Tableau 3. Paramètres estimés (b_1 et b_2) des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche, et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), pour les âges de 1 à 50 ans à la hauteur de 1,3 m.

Âge à 1,3 m (années)	b_1	b_2	REQM
1	1,2099	0,4460	2,4790
2	1,3582	0,3952	2,5126
3	1,2343	0,4321	2,4435
4	1,1212	0,4649	2,3733
5	1,0516	0,4848	2,3290
6	1,0294	0,4903	2,3006
7	0,9834	0,5023	2,2668
8	0,9351	0,5148	2,2391
9	0,8893	0,5266	2,2014
10	0,8434	0,5381	2,1527
11	0,7959	0,5499	2,0935
12	0,7228	0,5690	2,0140
13	0,6467	0,5889	1,9255
14	0,5818	0,6055	1,8400
15	0,5248	0,6203	1,7699
16	0,4643	0,6367	1,7192
17	0,3847	0,6587	1,6553
18	0,3010	0,6819	1,5706
19	0,2202	0,7045	1,4975
20	0,1465	0,7252	1,4387
21	0,0864	0,7421	1,3957
22	0,0301	0,7579	1,3572
23	-0,0191	0,7719	1,3193
24	-0,0621	0,7843	1,2903
25	-0,0987	0,7951	1,2686
26	-0,1296	0,8043	1,2516
27	-0,1537	0,8116	1,2450
28	-0,1708	0,8171	1,2455
29	-0,1756	0,8194	1,2464
30	-0,1803	0,8218	1,2524
31	-0,1949	0,8273	1,2553
32	-0,2154	0,8348	1,2448
33	-0,2502	0,8465	1,2204
34	-0,3020	0,8632	1,1807
35	-0,3655	0,8831	1,1256
36	-0,4301	0,9033	1,0631
37	-0,4882	0,9215	0,9961
38	-0,5381	0,9375	0,9281
39	-0,5731	0,9493	0,8623
40	-0,5958	0,9574	0,7909
41	-0,6140	0,9642	0,7159
42	-0,6290	0,9700	0,6390
43	-0,6456	0,9762	0,5601
44	-0,6614	0,9822	0,4826
45	-0,6665	0,9850	0,4033
46	-0,6650	0,9855	0,3231
47	-0,6721	0,9884	0,2406
48	-0,6813	0,9918	0,1605
49	-0,6851	0,9937	0,0927
50	-0,6871	0,9952	0,0677

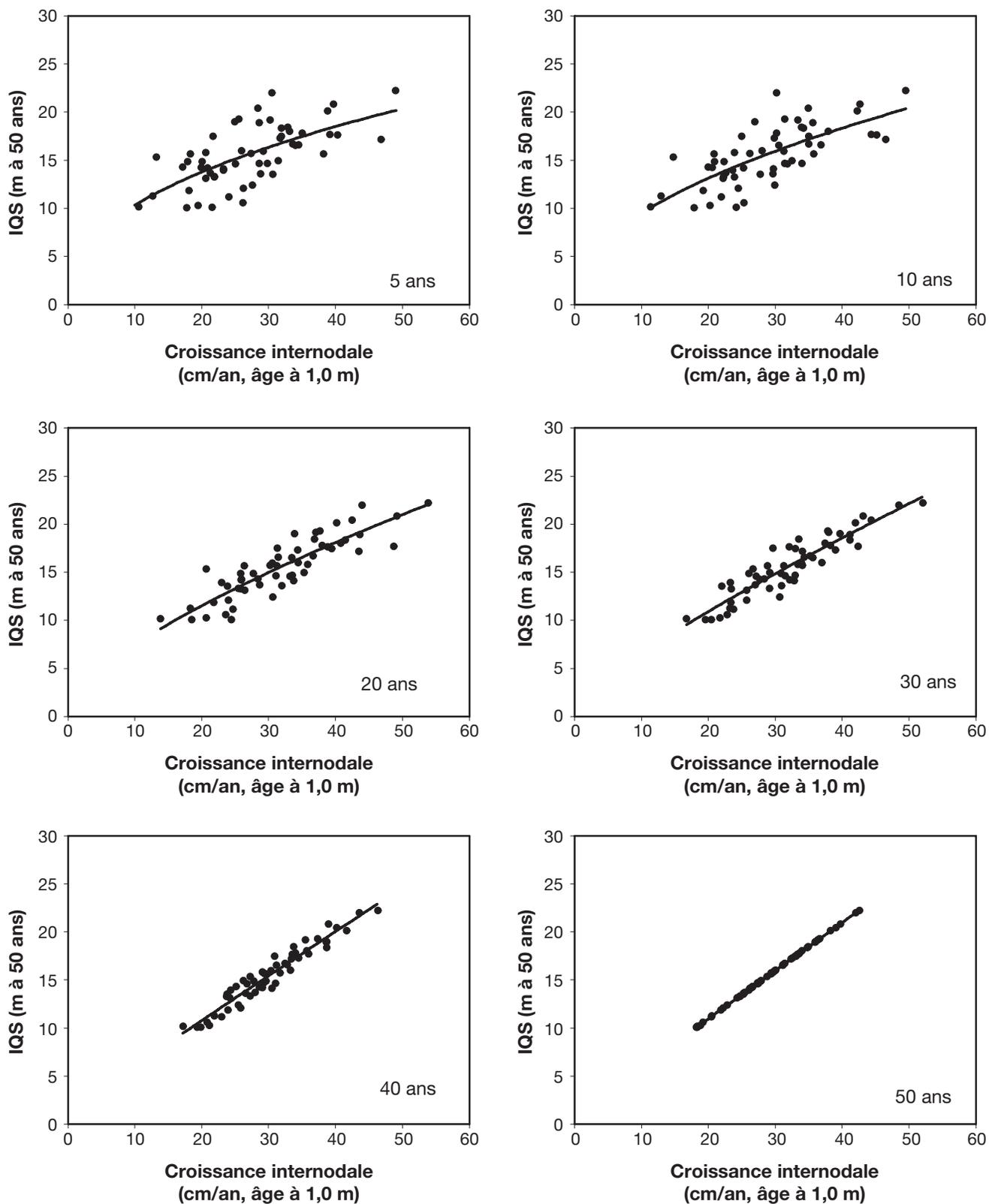


Figure 2. Relation entre l'IQS et la croissance internodale à 5, 10, 20, 30, 40 et 50 ans pour l'épinette blanche ($n = 56$), à une hauteur de référence de 1,0 m pour la lecture de l'âge.

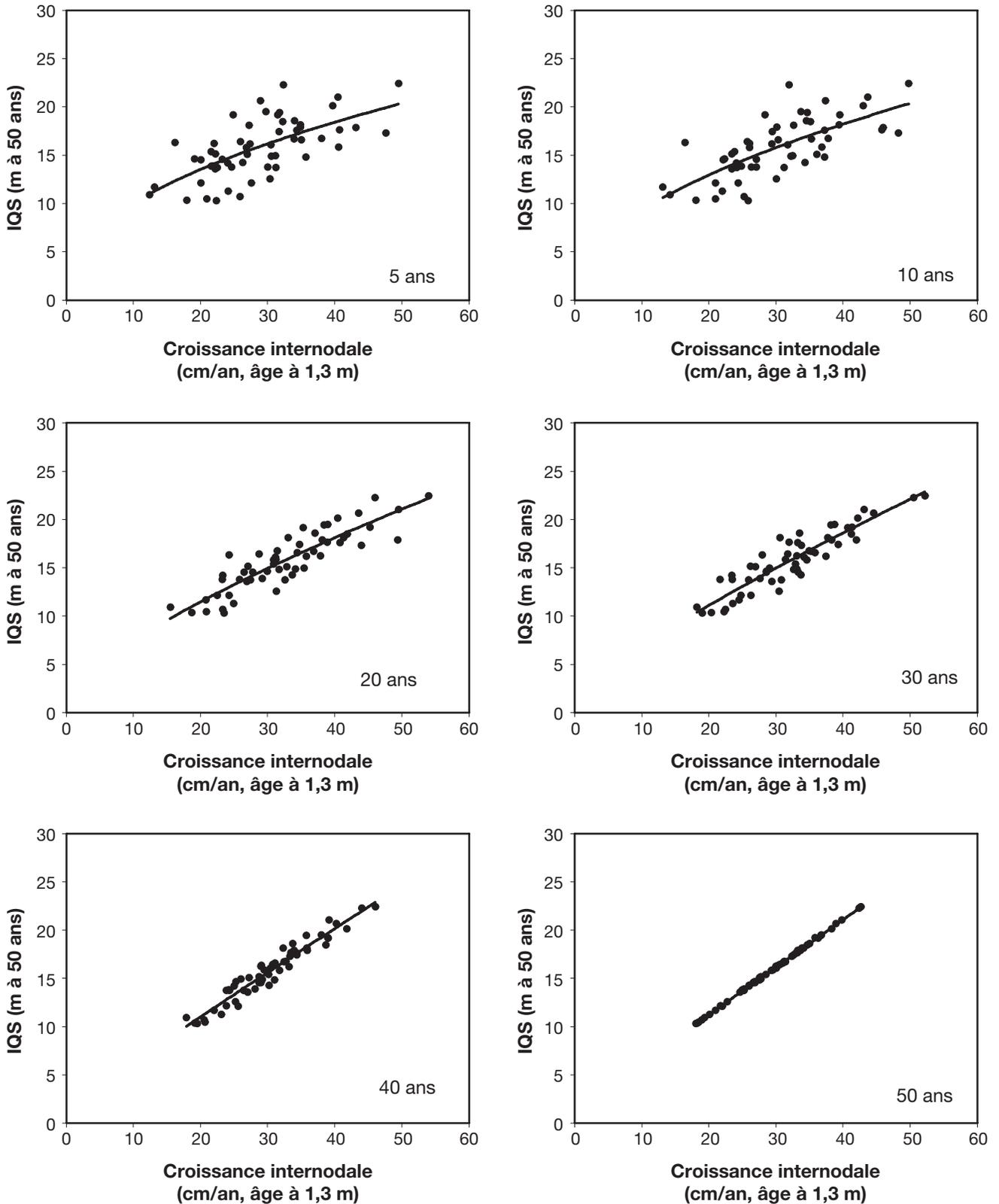


Figure 3. Relation entre l'IQS et la croissance internodale à 5, 10, 20, 30, 40 et 50 ans pour l'épinette blanche ($n = 56$), à une hauteur de référence de 1,3 m pour la lecture de l'âge.

Tableau 4. Indices de qualité de station (m à l'âge de 50 ans, hauteur de référence de l'âge à 1,0 m) estimés par le modèle de croissance internodale pour l'épinette blanche (âge à 1,0 m).

Âge à 1,0 m (années)	Hauteur totale (m)																						
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1																							
2																							
3	18,4	23,9																					
4	16,1	21,4																					
5	14,4	19,3	23,1																				
6	13,1	17,7	21,2																				
7	12,0	16,4	19,7	22,4																			
8	11,1	15,3	18,4	21,1	23,4																		
9	10,4	14,3	17,3	19,9	22,1																		
10	9,7	13,5	16,3	18,8	21,0	22,9																	
11	9,1	12,7	15,5	17,8	19,9	21,8																	
12	8,5	12,0	14,6	16,9	19,0	20,8	22,6																
13	8,0	11,3	13,9	16,1	18,1	19,9	21,6																
14		10,7	13,2	15,4	17,3	19,1	20,8	22,4															
15		10,1	12,5	14,7	16,6	18,4	20,0	21,6															
16		9,5	11,9	14,0	15,9	17,7	19,3	20,9	22,4														
17		9,0	11,3	13,4	15,3	17,0	18,7	20,2	21,7	23,1													
18		8,5	10,8	12,8	14,7	16,4	18,0	19,6	21,1	22,5													
19		8,0	10,2	12,2	14,1	15,8	17,4	19,0	20,5	21,9	23,3												
20		7,6	9,7	11,7	13,5	15,2	16,8	18,4	19,9	21,3	22,7												
21			9,3	11,2	13,0	14,7	16,3	17,8	19,3	20,8	22,2	23,5											
22			8,9	10,8	12,5	14,2	15,7	17,3	18,7	20,2	21,6	22,9											
23			8,5	10,3	12,0	13,7	15,2	16,7	18,2	19,6	21,0	22,4	23,7										
24			8,2	9,9	11,6	13,2	14,7	16,2	17,7	19,1	20,4	21,8	23,1										
25			7,9	9,6	11,2	12,8	14,3	15,7	17,2	18,5	19,9	21,2	22,5	23,8									
26			7,6	9,3	10,9	12,4	13,9	15,3	16,7	18,0	19,4	20,7	22,0	23,2									
27				9,0	10,5	12,0	13,5	14,9	16,2	17,6	18,9	20,2	21,4	22,7									
28				8,7	10,2	11,7	13,1	14,5	15,8	17,1	18,4	19,7	21,0	22,2	23,4								
29				8,4	9,9	11,3	12,7	14,1	15,4	16,7	18,0	19,2	20,5	21,7	22,9								
30				8,2	9,6	11,1	12,4	13,7	15,0	16,3	17,6	18,8	20,0	21,2	22,4	23,6							
31				8,0	9,4	10,8	12,1	13,4	14,7	16,0	17,2	18,4	19,6	20,8	21,9	23,1							
32				7,8	9,2	10,5	11,8	13,1	14,4	15,6	16,8	18,0	19,2	20,4	21,5	22,7	23,8						
33					8,9	10,3	11,6	12,8	14,1	15,3	16,5	17,7	18,9	20,0	21,2	22,3	23,4						
34					8,7	10,0	11,3	12,6	13,8	15,0	16,2	17,4	18,5	19,7	20,8	22,0	23,1	24,2					
35					8,5	9,8	11,0	12,3	13,5	14,7	15,9	17,1	18,2	19,4	20,6	21,7	22,8	23,9					
36					8,2	9,5	10,7	12,0	13,2	14,4	15,6	16,8	18,0	19,1	20,3	21,4	22,6	23,7					
37					8,0	9,2	10,5	11,7	12,9	14,1	15,3	16,5	17,7	18,8	20,0	21,1	22,3	23,4					
38						9,0	10,2	11,4	12,6	13,8	15,0	16,2	17,4	18,5	19,7	20,9	22,0	23,2	24,3				
39						8,7	9,9	11,1	12,3	13,5	14,7	15,9	17,1	18,2	19,4	20,6	21,7	22,9	24,0				
40						8,5	9,7	10,9	12,1	13,3	14,4	15,6	16,8	17,9	19,1	20,3	21,4	22,6	23,7				
41						8,3	9,5	10,7	11,8	13,0	14,2	15,3	16,5	17,6	18,8	19,9	21,1	22,2	23,4				
42							9,3	10,4	11,6	12,7	13,9	15,0	16,2	17,3	18,5	19,6	20,7	21,9	23,0				
43							9,1	10,2	11,4	12,5	13,6	14,8	15,9	17,0	18,2	19,3	20,4	21,5	22,6	23,8			
44							8,9	10,0	11,2	12,3	13,4	14,5	15,6	16,7	17,9	19,0	20,1	21,2	22,3	23,4			
45							8,8	9,9	11,0	12,1	13,2	14,3	15,4	16,5	17,6	18,7	19,8	20,9	21,9	23,0			
46							8,6	9,7	10,8	11,9	12,9	14,0	15,1	16,2	17,3	18,3	19,4	20,5	21,6	22,7			
47								9,5	10,6	11,7	12,7	13,8	14,8	15,9	17,0	18,0	19,1	20,1	21,2	22,3	23,3		
48								9,4	10,4	11,5	12,5	13,5	14,6	15,6	16,7	17,7	18,7	19,8	20,8	21,9	22,9		
49								9,2	10,2	11,3	12,3	13,3	14,3	15,4	16,4	17,4	18,4	19,5	20,5	21,5	22,5		
50									10,1	11,1	12,1	13,1	14,1	15,1	16,1	17,1	18,1	19,1	20,1	21,2	22,2	23,2	

Tableau 5. Indices de qualité de station (m à l'âge de 50 ans, hauteur de référence de l'âge à 1,3 m) estimés par le modèle de croissance internodale pour l'épinette blanche (âge à 1,3 m).

Âge à 1,3 m (années)	Hauteur totale (m)																						
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1																							
2																							
3	17,9	23,8																					
4	15,6	21,1																					
5	13,9	19,0	22,9																				
6	12,6	17,3	20,9																				
7	11,6	15,9	19,3	22,2																			
8	10,7	14,8	18,0	20,7	23,1																		
9	9,9	13,8	16,9	19,5	21,8																		
10	9,2	13,0	15,9	18,4	20,6	22,6																	
11	8,7	12,2	15,0	17,4	19,5	21,5																	
12		11,5	14,2	16,5	18,6	20,5	22,3																
13		10,8	13,4	15,7	17,8	19,7	21,4																
14		10,2	12,7	14,9	16,9	18,8	20,5	22,2															
15		9,6	12,1	14,2	16,2	18,0	19,7	21,3	22,9														
16		9,1	11,5	13,6	15,5	17,3	19,0	20,6	22,1	23,6													
17		8,6	10,9	13,0	14,9	16,7	18,3	19,9	21,5	22,9													
18			10,4	12,4	14,3	16,0	17,7	19,3	20,8	22,3	23,8												
19			9,9	11,9	13,7	15,5	17,1	18,7	20,2	21,7	23,2												
20			9,4	11,4	13,2	14,9	16,5	18,1	19,6	21,1	22,6	24,0											
21			9,0	10,9	12,7	14,4	16,0	17,5	19,0	20,5	21,9	23,3											
22			8,6	10,4	12,2	13,8	15,4	17,0	18,5	19,9	21,3	22,7	24,1										
23			8,2	10,0	11,7	13,4	14,9	16,4	17,9	19,3	20,8	22,1	23,5										
24				9,7	11,3	12,9	14,5	15,9	17,4	18,8	20,2	21,5	22,9	24,2									
25				9,3	11,0	12,5	14,0	15,5	16,9	18,3	19,7	21,0	22,3	23,6									
26				9,0	10,6	12,1	13,6	15,0	16,4	17,8	19,1	20,5	21,7	23,0									
27				8,8	10,3	11,8	13,2	14,6	16,0	17,3	18,6	19,9	21,2	22,5	23,7								
28				8,5	10,0	11,5	12,9	14,2	15,6	16,9	18,2	19,4	20,7	21,9	23,1								
29				8,3	9,8	11,2	12,6	13,9	15,2	16,5	17,7	19,0	20,2	21,4	22,6	23,8							
30					9,5	10,9	12,3	13,6	14,9	16,1	17,3	18,6	19,7	20,9	22,1	23,2							
31					9,3	10,7	12,0	13,3	14,5	15,8	17,0	18,2	19,3	20,5	21,7	22,8	23,9						
32					9,1	10,4	11,7	13,0	14,2	15,5	16,7	17,8	19,0	20,1	21,3	22,4	23,5						
33					8,9	10,2	11,5	12,7	14,0	15,2	16,3	17,5	18,7	19,8	21,0	22,1	23,2	24,3					
34					8,6	9,9	11,2	12,4	13,7	14,9	16,1	17,2	18,4	19,5	20,7	21,8	22,9	24,0					
35						9,6	10,9	12,1	13,4	14,6	15,8	16,9	18,1	19,3	20,4	21,5	22,7	23,8					
36						9,4	10,6	11,8	13,1	14,3	15,5	16,6	17,8	19,0	20,1	21,3	22,4	23,6					
37						9,1	10,3	11,6	12,8	14,0	15,2	16,3	17,5	18,7	19,8	21,0	22,1	23,3	24,4				
38						8,9	10,1	11,3	12,5	13,7	14,9	16,0	17,2	18,4	19,5	20,7	21,9	23,0	24,1				
39							9,8	11,0	12,2	13,4	14,6	15,8	16,9	18,1	19,2	20,4	21,5	22,7	23,8				
40							9,6	10,8	12,0	13,2	14,3	15,5	16,6	17,8	18,9	20,1	21,2	22,3	23,5				
41							9,4	10,6	11,8	12,9	14,1	15,2	16,3	17,5	18,6	19,7	20,9	22,0	23,1				
42							9,3	10,4	11,5	12,7	13,8	14,9	16,1	17,2	18,3	19,4	20,5	21,6	22,8	23,9			
43							9,1	10,2	11,3	12,4	13,6	14,7	15,8	16,9	18,0	19,1	20,2	21,3	22,4	23,5			
44							8,9	10,0	11,1	12,2	13,3	14,4	15,5	16,6	17,7	18,8	19,9	21,0	22,1	23,2			
45								9,8	10,9	12,0	13,1	14,2	15,3	16,3	17,4	18,5	19,6	20,6	21,7	22,8			
46								9,7	10,7	11,8	12,9	13,9	15,0	16,1	17,1	18,2	19,2	20,3	21,3	22,4	23,5		
47								9,5	10,5	11,6	12,6	13,7	14,7	15,8	16,8	17,9	18,9	19,9	21,0	22,0	23,1		
48									10,4	11,4	12,4	13,4	14,5	15,5	16,5	17,6	18,6	19,6	20,6	21,7	22,7		
49									10,2	11,2	12,2	13,2	14,2	15,2	16,3	17,3	18,3	19,3	20,3	21,3	22,3	23,3	
50									10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	

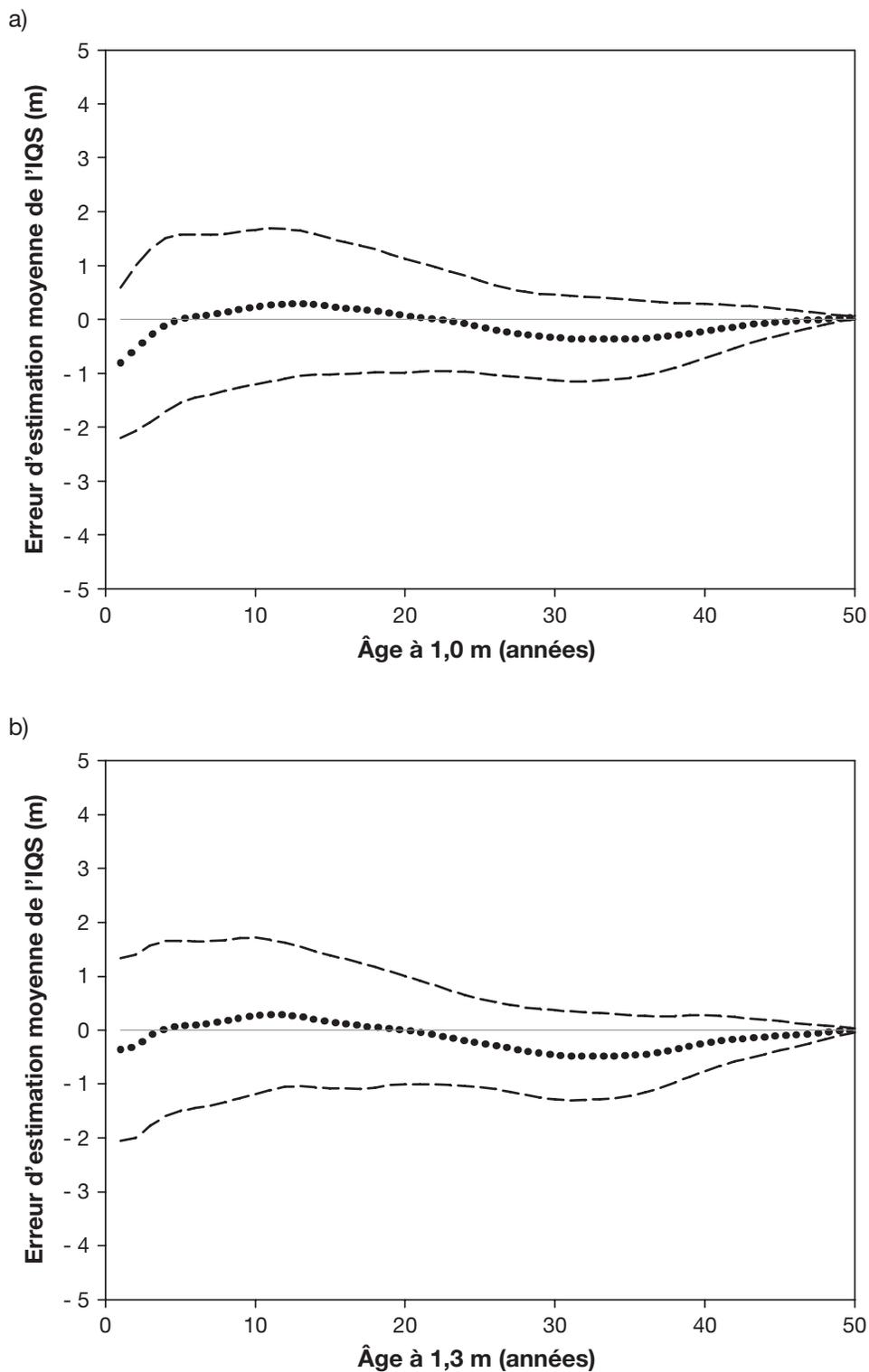


Figure 4. Erreur moyenne (ligne pointillée) et intervalle de confiance à 95 % (lignes brisées) de l'erreur moyenne du modèle de croissance internodale pour l'épinette blanche, à une hauteur de référence de 1,0 m (a) et de 1,3 m (b) pour la lecture de l'âge.

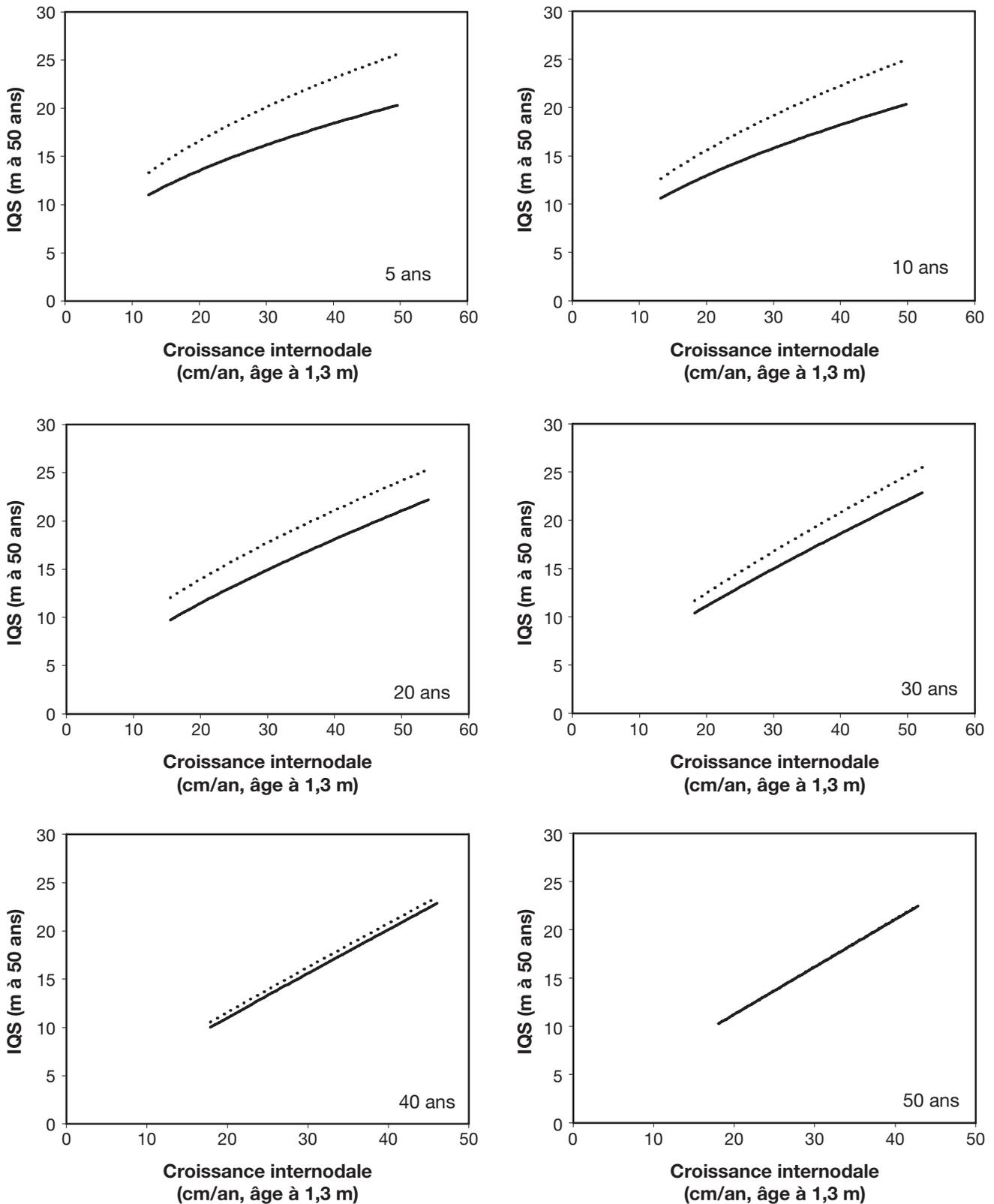


Figure 5. Comparaison des relations entre l'IQS et la croissance internodale à 5, 10, 20, 30, 40 et 50 ans pour l'épinette blanche du Québec (ligne pleine : cette étude) et de la Colombie-Britannique (ligne pointillée : Nigh 2004). La hauteur de référence pour la lecture de l'âge est de 1,3 m.

augmentation progressivement plus petite de l'IQS. Cela démontre aussi que les arbres qui croissent sur de bonnes stations atteignent un taux maximal de croissance en hauteur plus tôt que ceux qui croissent sur des sols pauvres (Thrower 1987).

Les modèles de croissance internodale fournissent un moyen pratique d'évaluer l'IQS des jeunes peuplements. Leur capacité d'évaluer avec précision l'IQS est toutefois plus faible dans le cas des très jeunes peuplements. Conséquemment, la précision de cette méthode d'estimation de l'IQS devrait être considérée lorsqu'on prévoit échantillonner des peuplements forestiers. Cette précision peut être estimée en multipliant par 2 la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne des tableaux 2 ou 3, ce qui donne l'étendue de l'ampleur de l'erreur dans l'estimation de l'IQS à laquelle on peut s'attendre dans 95 % des cas (Nigh 1998). Ainsi, par exemple, pour estimer un IQS avec une précision de 3 m, les relevés sur les peuplements ne doivent pas se faire avant 21 ans pour l'épinette blanche au Québec, lorsque l'âge de référence est pris à 1,0 m. De la même manière, si l'âge de référence est pris à 1,3 m, les relevés sur les peuplements ne doivent pas se faire avant 19 ans.

La validation des modèles pour l'épinette blanche a démontré que l'intervalle de confiance de l'erreur d'estimation moyenne diminuait avec l'âge des peuplements, pour les 2 hauteurs de référence de mesure de l'âge. Ceci indique qu'il est possible de se servir des modèles de croissance internodale dans les jeunes peuplements, mais que les IQS estimés pour les très jeunes âges pourraient être moins fiables. Dans les pires cas, à l'instar de ce qui a été observé en Colombie-Britannique (Nigh 2004) pour la même essence, les erreurs d'estimation obtenues à l'aide des données de validation peuvent atteindre jusqu'à 2 m dans les plus jeunes peuplements.

La comparaison des modèles de croissance internodale variable ajustés au Québec avec ceux ajustés en Colombie-Britannique a révélé des différences, particulièrement pour les modèles des âges₁₃₀ de 35 ans et moins. Ces écarts peuvent s'expliquer en partie par des différences notables quant à l'étendue de l'échantillonnage des tiges. Pour les modèles mis au point au Québec, plus de 56 placettes de 0,04 ha ont été utilisées (150 arbres), avec des IQS variant de 10,3 à 22,4 m à 50 ans (âge₁₃₀). Pour les modèles mis au point en Colombie-Britannique, seulement 18 placettes de 0,01 ha ont été utilisées (18 arbres), avec des IQS (âge₁₃₀) variant de 16,6 à

24,7 m à 50 ans. Hormis ces différences, il se peut également que le patron de croissance en hauteur de l'épinette blanche soit différent d'une région à l'autre du Canada. Cette différence pourrait s'expliquer en partie par les dissemblances géographiques et climatiques entre les 2 zones échantillonnées. Ainsi, la zone d'échantillonnage des données prises en Colombie-Britannique couvre théoriquement les latitudes allant du 54° au 60° degré Nord (zone biogéoclimatique de l'épinette blanche et de l'épinette noire, BC Ministry of Forests 1998), tandis que celle des placettes échantillonnées au Québec couvre des latitudes allant de 45,5° à 49,5° Nord. Il se peut également que, malgré les efforts consentis pour éliminer les arbres affaiblis par une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, certains de ceux retenus pour les modèles du Québec aient eu une trajectoire de croissance en hauteur dominante moins régulière que ce qui est attendu pour un arbre croissant en l'absence de telles épidémies.

Conclusion

Des modèles de croissance internodale pour l'épinette blanche sont désormais disponibles et applicables pour les conditions de croissance qui prévalent au Québec. L'échantillonnage réalisé dans le cadre de cette étude a permis de couvrir les principaux écosystèmes forestiers où l'on retrouve cette essence. Les modèles sont relativement précis et sont disponibles à 2 hauteurs de référence pour la détermination de l'âge (1,0 et 1,3 m), de telle sorte qu'ils peuvent être utilisés non seulement au Québec, mais aussi dans des régions limitrophes de la province. La validation des modèles a révélé une faible erreur d'estimation moyenne, qui n'occasionne donc pas d'inconvénients pratiques majeurs.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement MM. Hervé Lortie, Guy Brousseau et Carl Lemieux, techniciens forestiers, pour le travail de collecte de données en forêt. Les remerciements vont également à Mme Jolène Lemieux, technicienne forestière, pour la gestion et la validation des données et pour son travail avec le logiciel ANATI; à M. Jean Noël et Mme Véronique Poirier, techniciens en géomatique, pour leur aide dans la gestion des bases de données de la Direction des inventaires forestiers et pour la cartographie; à Mme Mélanie Gaudreault, biologiste, pour son aide lors de la préparation des données et

la programmation SAS des modèles; à MM. Vincent Laflèche, Carl Bergeron, Jean-Pierre Saucier, Philippe Racine et Claude Gagné pour leur assistance dans le prêt de données d'analyses de tiges; à M. Patrice Tardif, mathématicien, pour son aide avec le logiciel ANATI. Je remercie également Mme Josianne DeBlois pour son travail d'éditrice associée, ainsi que les deux réviseurs anonymes, pour leurs commentaires qui ont bonifié le document. Merci à Mmes Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page du document et à Mme Denise Tousignant pour l'édition. Ce travail a été financé dans le cadre du projet numéro 112310001 de la Direction de la recherche forestière.

Références

- Bates, D.M. et D.G. Watts, 1980. *Relative curvature measures of nonlinearity*. J. R. Statist. Soc. B. 42(1): 1-25.
- BC Ministry of Forests, 1998. *The ecology of the boreal white and black spruce zone*. British Columbia Ministry of Forests. Victoria, BC. 6 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/Bro/bro49.pdf].
- Boudoux, M., 1978. *Tables de rendement empiriques pour l'épinette noire, le sapin baumier et le pin gris au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Terres et forêts, COGEF, 101 p.
- Box, M.J., 1971. *Bias in nonlinear estimation*. J. R. Statist. Soc. B. 33(2): 171-201.
- Brokaw, N. et J. Thompson, 2000. *The H for DBH*. For. Ecol. Manage. 129: 89-91.
- Carmean, W.H., G. Hazenberg, J.S. Thrower et R.R. LaValley, 2006. *Site-index curves and growth intercepts for young white spruce plantations in north central Ontario*. North. J. Appl. For. 23(4): 257-263.
- DeLong, C., R.M. Annas et A.C. Stewart, 1991. *Boreal white and black spruce zone*. Chapitre 16. Dans : Meidinger, D. et J. Pojar (éditeurs). *Ecosystems of British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Special Report Series 06. p. 237-250. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Srs/Srs06.htm].
- Endrenyi, L. et F.H.F. Kwong, 1981. *Tests for the behaviour of experimental errors*. Dans : Endrenyi, L. (éditeur). *Kinetic data analysis*. Plenum Press. New York, NY (États-Unis). p. 89-103.
- Farrar, J.L., 1996. *Les arbres du Canada*. Les Éditions Fides. Saint-Laurent, QC. 502 p.
- Fekedulegn, F., M.P. Mac Siurtain et J.J. Colbert, 1999. *Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry*. Silva Fenn. 33(4): 327-336.
- Guay, R., R. Gagnon et H. Morin, 1992. *A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera*. For. Chron. 68: 138-141.
- Guo, J.P. et J.R. Wang, 2006. *Comparison of height growth and growth intercept models of jack pine plantations and natural stands in northern Ontario*. Can. J. For. Res. 36(9): 2179-2188.
- Holmes, R.L., 1983. *Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement*. Tree-Ring Bull. 43: 69-78.
- Huang, S., 1996. *Interim growth intercept models for predicting site index in young spruce, pine and aspen stands*. Alberta Land and Forest Service, Land and Forest Service, Forest Management Division. Edmonton, AB. Report T/338. 11 p.
- Kalischuk, M., P.V. Blenis et L.M. Kawchuk, 2006. *A light-adjusted growth intercept model for predicting white spruce site index*. West. J. Appl. For. 21(2): 68-71.
- Kwiaton, M.M., J.R. Wang et D.E.B. Reid, 2011. *A height growth model and associated growth intercept models for estimating site index in black spruce (Picea mariana Mill. BSP) plantations in northern Ontario, Canada*. North. J. Appl. For. 28(3): 129-137.
- Laflèche, V., S. Bernier, J-P. Saucier et C. Gagné, 2013. *Indices de qualité de station des principales essences commerciales en fonction des types écologiques du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers. 115 p. [www.mrn.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/indices-qualite.pdf].
- Maily, D. et M. Gaudreault, 2005. *Modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier au Québec*. For. Chron. 81(1): 114-124.
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2012. *Normes d'inventaire écoforestier. Placettes-échantillons permanentes. Édition provisoire mai 2012*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers. 230 p.

- Nigh, G.D., 1995. *Variable growth intercept models for Lodgepole pine in the sub-boreal spruce biogeoclimatic zone, British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Research Report RR-02. 22 p. [www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/0100.htm].
- Nigh, G.D., 1996. *A variable growth intercept model for spruce in the Sub-Boreal spruce and Engelmann Spruce-Subalpine Fir biogeoclimatic zones of British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Research Report RR-05. 20 p. [www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/0095.htm].
- Nigh, G.D., 1997a. *A growth intercept model for coastal Douglas fir*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Research Report RR-10. 20 p. [www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/0038.htm].
- Nigh, G.D., 1997b. *Revised growth intercept models for lodgepole pine: comparing northern and southern models*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Extension Note 11. 6 p. [www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/0084.htm].
- Nigh, G.D., 1997c. *Interior Douglas-fir growth intercept models*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Extension Note 12. 6 p. [www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/0085.htm].
- Nigh, G.D., 1998. *A system for estimating height and site index of western hemlock in the interior of British Columbia*. For. Chron. 74: 588-96.
- Nigh, G.D., 1999. *Revised growth intercept model for coastal western hemlock, Sitka spruce, and interior spruce*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Extension Note 37. 8 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/en/en37.htm].
- Nigh, G.D., 2000. *Western redcedar site index models for the interior of British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Research Report RR-18. 24 p. [www.for.gov.bc.ca/hre/pubs/pubs/1140.htm].
- Nigh, G.D., 2002. *Growth intercept, years-to-breast-height, and juvenile height growth models for Ponderosa Pine*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Technical Report 2. 16 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Tr/Tr002.htm].
- Nigh, G.D., 2004. *Growth intercept and site series-based estimates of site index for white spruce in the Boreal White and Black Spruce biogeoclimatic zone*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Technical Report 13. 16 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Tr/Tr013.htm].
- Nigh, G.D., 2009. *Amabilis fir height-age and growth intercept models for British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests and Range, Forest Science Program. Victoria, BC. Research Report 30. 17 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/Rr/Rr30.htm].
- Nigh, G.D. et K. Klinka, 2001. *Growth intercept models for black spruce*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Extension Note 57. 4 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/En/En57.htm].
- Nigh, G.D. et B.A. Love, 1999. *How well can we select undamaged site trees for estimating site index?* Can. J. For. Res. 29(12): 1989-1992.
- Nigh, G.D. et P.J. Martin, 2001. *A method to assess the performance of growth intercept models in British Columbia*. For. Chron. 77: 491-499.
- Nigh, G.D., D. Brisco et D. New, 1999. *Growth intercept models for western larch*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Victoria, BC. Extension Note 38. 4 p. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/En/En38.htm].
- Pothier, D. et F. Savard, 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers, Direction des programmes forestiers et Direction de la recherche forestière. 198 p. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/actualisation-tables-production.pdf].
- Ratkowski, D.A., 1983. *Nonlinear regression modeling*. 1^{re} édition. Marcel Dekker, Inc. New York, NY (États-Unis). 276 p.
- SAS Institute Inc., 2011. *SAS/STAT® 9.3 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis).
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille et J.-F. Bergeron, 2003. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. Code de diffusion : 2003-3043. 2 p. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-vegetation-2003.pdf].

- Sen, A.K. et M. Srivastava, 1990. *Regression analysis: theory, methods, and applications*. Springer-Verlag, New York, NY (États-Unis). 348 p.
- Shapiro, S.S. et M.B. Wilk, 1965. *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. *Biometrika* 52(3/4): 591-611.
- Skovsgaard, J.P. et J.K. Vanclay, 2008. *Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands*. *Forestry* 81: 13-31.
- Tardif, P., 2001. ANATI (Win32 / Matlab R 11.3, v 2.2) [Logiciel]. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Document interne. 8 p.
- Thrower, J.S., 1987. *Growth intercepts for estimating site quality of young white spruce plantations in north central Ontario*. *Can. J. For. Res.* 17: 1385-1389.
- Vézina, P.-E. et A. Linteau, 1968. *Growth and yield of balsam fir and black spruce in Quebec*. Department of Forestry and Rural Development Canada, Forestry Branch. Information Report Q-X-2. 58 p.



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 développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou 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.

**Ressources
naturelles**

Québec 

ISSN 0834-4833
ISBN 978-2-550-69999-6
ISBN (pdf) 978-2-550-70000-5
F.D.C. 541
L.C. SD387.S53
Dépôt légal 2014
Bibliothèque nationale du Québec
© 2014 Gouvernement du Québec