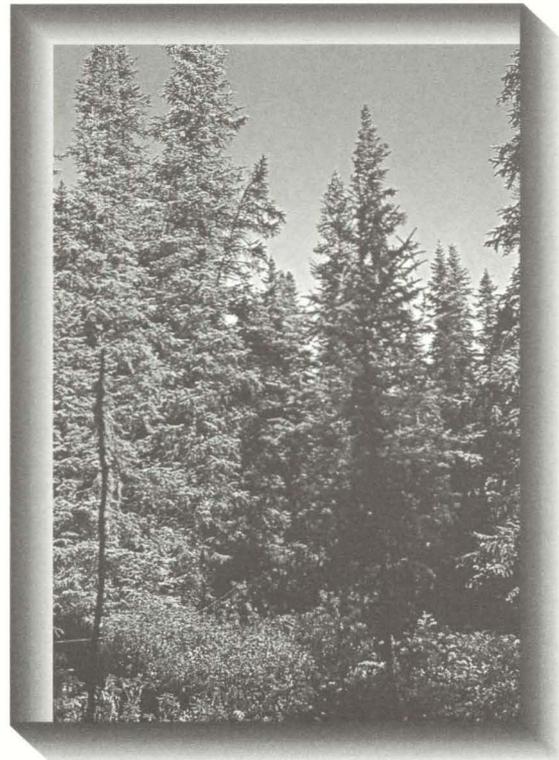
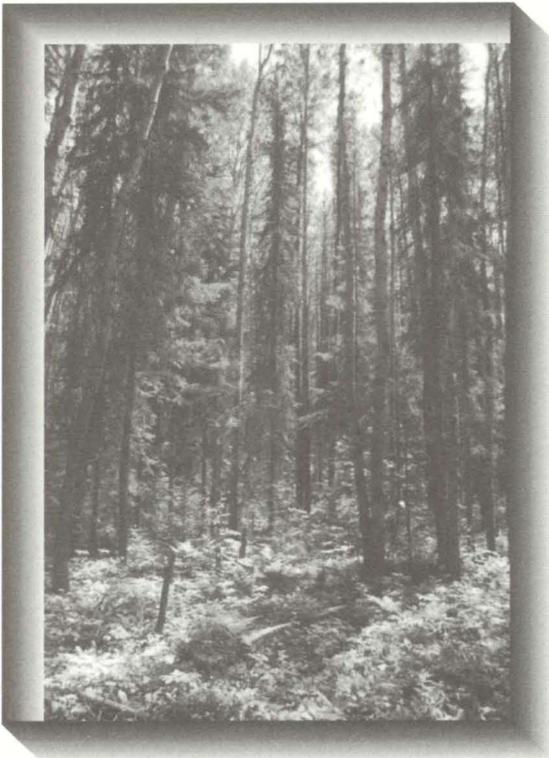




Fonctions polymorphes de productivité de site pour l'épinette noire selon divers types écologiques

Guy R. Larocque, W. John Parton
et David J. Archibald



Centre de foresterie des Laurentides
Rapport d'information LAU-X-119F

Nord-Est Science & Technologie (NEST)
Rapport technique NEST TR-033



Ressources naturelles
Canada
Service canadien
des forêts

Natural Resources
Canada
Canadian Forest
Service



**Fonctions polymorphes de productivité de site pour
l'épinette noire selon divers types écologiques
dans le nord de l'Ontario**

Guy R. Larocque, W. John Parton¹
et David J. Archibald²

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts - Centre de foresterie des Laurentides
Sainte-Foy (Québec)

Rapport d'information LAU-X-119F

Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
Nord-Est Science & Technologie (NEST)
South Porcupine (Ontario)

Rapport technique NEST TR-033

1996

¹ Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Nord-Est Science & Technologie, Édifice du gouvernement de l'Ontario, Route 101 Est, C.P. 3020, South Porcupine (Ontario) P0N 1H0.

² Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Nord-Ouest Science & Technologie, R.R. #1, 20th Side Road, Thunder Bay, Ontario, P7C 4T9.

DONNÉES DE CATALOGAGE AVANT PUBLICATION (CANADA)

Larocque, G. (Guy), 1955-

Fonctions polymorphes de productivité de site pour l'épinette noire
selon divers types écologiques dans le nord de l'Ontario

(Rapport d'information, ISSN 0835-1589; LAU-X-119F)

Publ. aussi en anglais sous le titre : Polymorphic site productivity
functions for black spruce in relation to different ecological types in
Northern Ontario.

Comprend des références bibliographiques.

ISBN 0-662-81680-3

Cat. GCC no Fo46-18/119F

1. Épinette noire -- Ontario (Nord) -- Croissance.
2. Forêts -- Productivité -- Ontario (Nord).
 - I. Parton, W. John.
 - II. Archibald, David J.
 - III. Centre de foresterie des Laurentides.
 - IV. Titre.
 - V. Collection : Rapport d'information (Centre de foresterie
des Laurentides); LAU-X-119F.

SD397.B53L3614 1996 634.9'752285 C96-901078-8

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada 1996
Numéro de catalogue GCC Fo46-18/119F
ISBN 0-662-81680-3
ISSN 0835-1589

Il est possible d'obtenir sans frais un nombre restreint d'exemplaires de cette publication auprès de :

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides
1055, rue du P.E.P.S., C.P. 3800
Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

Nord-Est Science & Technologie (NEST)
Édifice du gouvernement de l'Ontario
Route 101 Est, C.P. 3020
South Porcupine (Ontario) P0N 1H0

Site Web du CFL : <http://www.cfl.forestry.ca>

Des copies ou des microfiches de cette publication sont en vente chez :

Micromédia Ltée
240, rue Catherine, bureau 305
Ottawa (Ontario) K2P 2G8
Tél. : (613) 237-4250
Ligne sans frais : 1-800-567-1914
Télééc. : (613) 237-4251

This publication is also available in English under the title "Polymorphic site productivity functions for black spruce in relation to different ecological types in Northern Ontario" (CCG Catalog No. Fo46-18/119E).



TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES	2
RÉSULTATS	5
DISCUSSION	15
CONCLUSIONS	16
REMERCIEMENTS	16
OUVRAGES CONSULTÉS	17

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Statistiques sommaires pour la base de données	4
Tableau 2.	Sommaire des caractéristiques des groupes opérationnels inclus dans la présente étude	4
Tableau 3.	Paramètres de la fonction de Weibull calculés pour chaque groupe opérationnel	7
Tableau 4.	Modèles de régression pour les fonctions de productivité de site	8

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Localisation de la zone argileuse en Ontario (Canada)	3
Figure 2.	Similarités et différences entre les caractéristiques des groupes opérationnels (GO) analysés en vue de la fusion des GO 5 et 8, 7 et 9 ainsi que 12 et 13	6
Figure 3.	Hauteurs dominantes observées et fonction de Weibull ajustée pour chaque groupe opérationnel obtenu par regroupement	7
Figure 4.	Courbes d'indice de site obtenues au moyen de la fonction utilisée par Payandeh	9
Figure 5.	Courbes d'indice de site obtenues au moyen de la fonction basée sur la fonction de Weibull	10
Figure 6a.	Comparaison entre les hauteurs dominantes observées et prédites pour le groupe opérationnel 5/8	11
Figure 6b.	Comparaison entre les hauteurs dominantes observées et prédites pour le groupe opérationnel 7/9	12
Figure 6c.	Comparaison entre les hauteurs dominantes observées et prédites pour le groupe opérationnel 11	13
Figure 6d.	Comparaison entre les hauteurs dominantes observées et prédites pour le groupe opérationnel 12/13	14

Larocque, G.R.; Parton, W.J.; Archibald, D.J. 1996. Fonctions polymorphes de productivité de site pour l'épinette noire selon divers types écologiques dans le nord de l'Ontario. Ressour. nat. Can., Serv. can. for., Cent. for. Laurentides, Sainte-Foy, Qc. Rapp. inf. LAU-X-119F.

RÉSUMÉ

Des fonctions polymorphes de productivité de site ont été développées pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) dans la Zone argileuse du nord de l'Ontario à partir de données de parcelles-échantillons permanentes. L'intention première fut de relier différentes tendances de croissance en hauteur aux caractéristiques des groupes opérationnels du système de classification écologique des forêts développé pour la Zone argileuse de l'Ontario. Cinq modèles basés sur les fonctions logistique, de Chapman-Richards et de Weibull ont été testés. Des variables factices ont été incorporées dans les modèles afin de représenter l'influence des différents groupes opérationnels sur la productivité des sites. L'intégration d'information écologique de base et de fonctions polymorphes d'indice de site a permis d'expliquer adéquatement les tendances de croissance à l'intérieur de chaque groupe opérationnel. Ainsi, même si certains groupes opérationnels avaient des indices de site très similaires à 50 ans, ils étaient caractérisés par différentes tendances de croissance en hauteur à long terme. Parmi les divers modèles testés, la fonction de Weibull et la fonction de Chapman-Richards, modifiées pour minimiser le biais à l'âge de référence, ont mieux représenté les données.

Larocque, G.R.; Parton, W.J.; Archibald, D.J. 1996. Polymorphic site productivity functions for black spruce in relation to different ecological types in northern Ontario. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Laurentian For. Cent., Sainte-Foy, Que. Inf. Rep. LAU-X-119.

ABSTRACT

Polymorphic site productivity functions were derived for black spruce (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) in the Clay Belt region of Northern Ontario using data from permanent sample plots. The main intent was to relate different height growth patterns to the characteristics of the operational groups of the forest ecosystem classification implemented for Ontario's Clay Belt. Five models based on the logistic, Chapman-Richards and Weibull functions were tested. Dummy variables were incorporated into the models to represent the influence of different operational groups on site productivity. The integration of basic ecological information and polymorphic site productivity functions provided a good explanation of the growth patterns within each operational group. Thus, although some operational groups had very close site index values at age 50, they were characterized by different patterns of long-term height development. Of the various models tested, the Weibull and Chapman-Richards functions, constrained to satisfy the condition that top height equals site index at age 50, produced the best fit.

INTRODUCTION

Malgré ses limites, l'indice de site demeure la méthode la plus utilisée en Amérique du Nord pour évaluer la productivité des sites. La pratique courante consiste à élaborer des courbes anamorphes d'indice de site puisque celles-ci sont faciles à développer à partir de données provenant de parcelles-échantillons temporaires. Ces courbes sont très utilisées pour l'analyse des approvisionnements en matière ligneuse. Des exemples récents peuvent être trouvés dans Gordon et collab. (1989), Phillips (1992), Williams et collab. (1990), Hacker et Bilan (1991) et Gilmore et collab. (1993). Cependant, on a montré que ces courbes présentent des lacunes importantes (Carmean, 1968, 1972 et 1975; Monserud, 1984a et 1985; Dolph, 1991), dont l'hypothèse de proportionnalité d'un site à l'autre (Carmean, 1968 et 1972; Graney et Burkhart, 1973; Hann et Scrivani, 1987). Comme il a été estimé que les courbes polymorphes d'indice de site représentent mieux la variabilité des tendances de croissance en hauteur selon différents sites (Daniel et collab., 1979; Monserud, 1984a; Smith, 1984), ces courbes ont fait l'objet de nombreuses études depuis quelques décennies. Cependant, leur développement demeure plus difficile et plus dispendieux que celui de courbes anamorphes d'indice de site puisque des données répétées provenant d'analyses de tiges ou de mesurage successif de parcelles-échantillons permanentes sont nécessaires. À titre d'exemples récents notons les travaux de Borders et collab. (1984), Biging (1985), Dolph (1987 et 1991), Alemdag (1988 et 1991), Newnam (1988), Cieszewski et Bella (1989), Curtis et collab. (1990), Quenet et Manning (1990), Cao et Durand (1991), Ker et Bowling (1991), Goelz et Burk (1992) et Newton (1992).

Au cours des trois dernières décennies, on a surtout cherché (i) à appliquer et perfectionner des modèles non linéaires fondés principalement sur la fonction de Richards (1959), (ii) à utiliser des techniques d'analyse de tiges pour obtenir des données de mesurage à partir d'arbres individuels, (iii) à relier l'indice de site aux facteurs environnementaux et (iv) à élaborer des fonctions invariantes à l'âge de référence (p. ex. : Bailey et Clutter, 1974; Cieszewski et Bella, 1989; Goelz et Burk, 1992; Newton, 1992; Cao, 1993; Payandeh et Wang, 1994). L'avènement d'ordinateurs performants a facilité l'estimation des paramètres de modèles non linéaires et l'étude de relations complexes entre les facteurs environnementaux et la croissance des arbres. En ce qui concerne l'intégration de facteurs

environnementaux, une approche populaire a consisté à relier les valeurs de l'indice de site à des facteurs propres au site comme (i) la teneur en éléments nutritifs du sol ou les conditions de drainage (p. ex. : Payandeh, 1986; Brown et Marquard, 1988; Walters et collab., 1990; Klinka et Carter, 1990; Monserud et collab., 1990; Gale et collab., 1991; Tamminen, 1993), (ii) les classes écologiques issues des systèmes de classification écologique (p. ex. : Green et collab., 1989), (iii) la présence d'espèces de sous-étage (p. ex. : Corns et Pluth, 1984; Strong et collab., 1991; Nieppola, 1993) et (iv) les principaux types de sols (p. ex. : Steinbrenner, 1979; Schmoltd et collab., 1985; Rayner, 1991).

L'objectif de cette approche a été de fournir un moyen d'estimer la productivité potentielle d'une essence particulière sur un site donné. Le développement de relations entre l'indice de site et les facteurs environnementaux ne s'est pas avéré un succès, sauf dans quelques cas (p. ex. : Wang, Q. et collab., 1994). Gale et collab. (1991) ont suggéré les raisons suivantes pour expliquer cette situation : présence de colinéarité entre les variables édaphiques, nombre insuffisant d'échantillons et incapacité des modèles à représenter les interactions complexes entre les divers processus au niveau du sol. Le nombre élevé de facteurs écologiques à échantillonner et la faiblesse des relations établies ont jusqu'à maintenant limité l'utilisation de cette approche pour la planification opérationnelle.

Une autre approche à caractère environnemental consiste à développer des courbes d'indice de site pour plusieurs types d'habitats ou groupes pédologiques (p. ex. : Zahner, 1962, Golden et collab., 1981; Monserud, 1984b et 1985; Amateis et Burkhart, 1985; Payandeh, 1991b; Stansfield et collab., 1991; Huang, 1994; Wang, G.G. et collab., 1994). Cette approche présuppose que les divers types d'habitats ou groupes pédologiques intègrent adéquatement les différents facteurs du site qui affectent les tendances à long terme de développement en hauteur. Sa facilité d'utilisation avec les systèmes de classification écologique favorise cette approche. Les études de Monserud (1984b et 1985), Payandeh (1991b) et de Stansfield et collab. (1991) sont particulièrement intéressantes à cet égard puisque les fonctions de productivité développées par ces auteurs renferment des variables prédictives intégrant l'incidence de divers types écologiques. Comme cette approche consiste à développer des fonctions de productivité du site qui associent les tendances de croissance et les

conditions de croissance, elle a le potentiel d'expliquer une plus grande partie de la variabilité des tendances à long terme du développement en hauteur au sein d'une même banque de données. Par conséquent, elle a aussi le potentiel d'atteindre plus complètement un des objectifs fondamentaux des courbes d'indice de site, qui est de déterminer quelle tendance à long terme de croissance en hauteur est possible pour un peuplement donné (Clutter et collab., 1983). La méthodologie de base de cette approche a consisté à développer des courbes d'indice de site à partir de données obtenues par analyse de tiges. L'utilisation de données de mesurage à long terme provenant de parcelles permanentes a rarement été effectuée.

La présente étude avait pour objectifs : (i) de développer des fonctions de productivité du site pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) pour différents groupes opérationnels (GO) tels que définis par le Système de classification écologique des forêts (SCEF) utilisé en Ontario (Jones et collab., 1983) à partir de données de mesurage provenant de parcelles-échantillons permanentes; et (ii) d'examiner si les diverses formes de courbes de croissance en hauteur peuvent être associées aux caractéristiques écologiques des différents groupes opérationnels.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données proviennent de parcelles-échantillons permanentes établies par la société Spruce Falls Power and Paper Co. dans la Zone argileuse du nord de l'Ontario, au Canada (figure 1). L'épinette noire est l'espèce dominante de la région, mais elle est souvent accompagnée des espèces suivantes : pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch), bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.), peuplier baumier (*Populus balsamifera* L.), thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) et peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.). Dans le cadre de la présente étude, seules les parcelles provenant de peuplements naturellement régénérés après incendie ou récolte et dans lesquelles l'épinette noire occupe au moins 60 % de la surface terrière ont été retenues. La majorité de ces parcelles avaient fait l'objet de plusieurs mesurages, ce qui nous a permis d'évaluer le développement à long terme de chaque peuplement (tableau 1). Le nombre des mesures effectuées pour chaque parcelle allait de 1 à 12, et les arbres variaient considérablement quant à leur âge, diamètre à hauteur de poitrine (dhp) et hauteur. Plus de la moitié des parcelles avaient fait l'objet d'au moins huit mesurages. L'âge des

peuplements a été calculé en terme de nombre d'années depuis la récolte ou l'incendie. De plus, ces peuplements ont été classés selon les groupes opérationnels du SCEF pour la zone argi-leuse. Ces groupes sont définis en fonction des caractéristiques du sol et de la présence de certaines espèces dans le sous-étage et dans l'étage dominant (tableau 2).

La taille des parcelles variait de 0,10 acre (0,04 ha) à 1 acre (0,40 ha). Le dhp de tous les arbres de chaque parcelle a été mesuré à différents âges, et les résultats furent regroupés en classes d'intervalle de 1 pouce (2,54 cm). Comme la hauteur n'a été mesurée que pour un sous-échantillon d'arbres, la fonction suivante a été ajustée pour permettre l'évaluation de la hauteur dominante (100 plus grands arbres ha⁻¹) :

$$(\text{Hauteur} - 1,3) = b_1(\text{dhp}) + b_2(\text{âge}) \quad [1]$$

Initialement, cette équation fut ajustée pour chacun des groupes opérationnels. Cependant, des analyses ultérieures ont montré que l'équation suivante convenait à l'ensemble des groupes opérationnels :

$$(\text{Hauteur} - 1,3) = 0,59848(\text{dhp}) + 0,03455(\text{âge}) \\ R^2 = 0,97, \text{ET}_E = 2,02 \quad [2]$$

Cette équation fut utilisée pour calculer la hauteur dominante des peuplements pour chacune des parcelles et chaque âge de mesure. Les hauteurs dominantes furent ensuite regroupées dans les différents groupes opérationnels et les paramètres de la fonction de Weibull (Yang et collab., 1978) furent estimés par régression non linéaire :

$$\text{Hauteur dominante} = b_0(1 - \exp^{-(b_1 \text{âge})^{b_2}}) \quad [3]$$

L'ajustement de cette fonction pour chaque groupe opérationnel fut repris afin de déterminer la tendance de croissance en hauteur au sein de chaque groupe opérationnel et d'estimer l'indice de site des parcelles-échantillons pour lesquelles aucune mesure n'avait été effectuée à l'âge de référence (50 ans). Cinq fonctions de productivité de site qui comprenaient des variables factices pour représenter les différences entre les groupes opérationnels furent ajustées. La première de ces fonctions était basée sur le modèle établi par Monserud (1984b) pour le douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) dans divers types d'habitats :

$$H_{\text{FEC}} = \frac{b_1 S^{b_2}}{(1 - \exp^{(b_3 + b_4 \ln(\text{âge}) + (a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) \ln(s)))}) \quad [4]$$



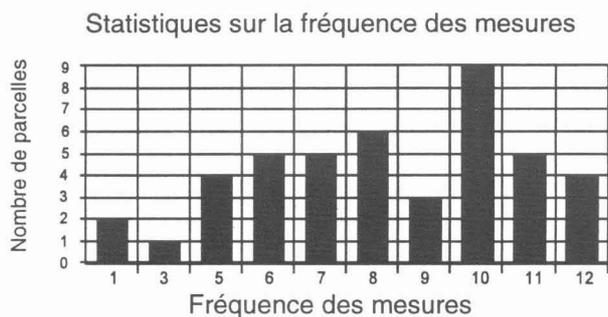
Figure 1. Localisation de la zone argileuse en Ontario (Canada).

Tableau 1. Statistiques sommaires pour la base de données

	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart-type
Âge (ans)	9	91	171	38,31
Dhp (cm)	2,5	19,6	55,9	5,92
Hauteur (m)	1,5	14,9	39,3	4,55

Nombre d'observations : 10 424

Nombre de parcelles permanentes : 44

**Tableau 2.** Sommaire des caractéristiques des groupes opérationnels inclus dans la présente étude (adapté de Jones et collab., 1983)

	Groupe opérationnel	Types forestiers communs ^a	Textures de sol communes	Régimes d'humidité communs ^b
5	Mousses hypnacées - sol fin	EPN, EPN-PIG, PIG	loam fin, argile	3-6
7	Forêt mixte - plantes herbacées abondantes	PE, PE-SAB-EPB, PE-EPN, PE-BOP	argile, loam fin	2-4
8	Mousses hypnacées - sphaignes	EPN	loam fin, argile	5-6
9	Conifères - plantes herbacées et mousses abondantes	EPN, EPB-SAB, EPB-THO	loam fin, argile	4-6
11	Thé du Labrador	EPN	sol organique	7-8
12	Aulnes - plantes herbacées peu abondantes	EPN, EPN-THO	sol organique	7-8
13	Aulnes - plantes herbacées abondantes	EPN, EPN-MEL-THO, THO-MEL	sol organique	7-8

^a Abréviations utilisées pour les espèces d'arbres : EPN, épinette noire; PIG, pin gris; SAB, sapin baumier; BOP, bouleau à papier; THO, thuya occidental; MEL, mélèze laricin; PE, peuplier baumier ou peuplier faux-tremble; EPB, épinette blanche.

^b Codes des régimes d'humidité : 2, frais; 3, très frais; 4, modérément humide; 5, humide; 6, très humide; 7, modérément mouillé; 8, très mouillé.

où H_{FEC} représente la hauteur dominante pour un groupe opérationnel donné, et S l'indice de site à un âge donné. Z_n indique la présence (1) ou l'absence (0) de groupes opérationnels pour des valeurs spécifiques d'indices de site et à des âges précis. Enfin, a_n et b_n sont des paramètres. La deuxième équation était basée sur la fonction de Richards (1959) telle que modifiée par Payandeh (1991b) :

$$H_{FEC} = b_1 S^{(a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots)} (1 - \exp^{(-b_2 \text{âge})})^{b_3} \quad [5]$$

Les trois fonctions suivantes ont été assujetties à une contrainte pour satisfaire la condition que la hauteur dominante soit égale à l'indice de site à l'âge de référence (50 ans). La première de ces équations fut la fonction développée par Hann et Scrivani (1987) :

$$H_{FEC} = S \frac{(1 - \exp^{\exp(b_1 + (a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) \ln(\text{âge}) + b_2 \ln(S)))})}{1 - \exp^{\exp(b_1 + (a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) \ln(50) + b_2 \ln(S))}} \quad [6]$$

La deuxième fonction ainsi contrainte était basée sur la fonction de Richards (1959) :

$$H_{FEC} = S \left\{ \frac{(1 - \exp^{-(a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) \text{âge}})}{(1 - \exp^{-(a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) 50})} \right\}^{(b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots)} \quad [7]$$

La troisième de ces équations fut basée sur la fonction de Weibull et contrainte d'une manière semblable à celle proposée par Burkhart et Tennent (1977) :

$$H_{FEC} = S \frac{(1 - \exp^{-(a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) \text{âge}})^{(b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots)}}{1 - \exp^{-(a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots) 50} \text{ }^{(b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots)}} \quad [8]$$

Ces équations furent évaluées en calculant le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur-type de l'évaluation (ET_E). Comme suggéré par Kvålseth (1985) et Cornell et Berger (1987) pour les modèles non linéaires, le coefficient de détermination fut calculé comme suit :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\text{valeur observée} - \text{valeur prédite})^2}{\sum (\text{valeur observée} - \text{moyenne des valeurs observées})^2} \quad [9]$$

Les prédictions obtenues de la meilleure équation ajustée furent comparées aux valeurs mesurées obtenues de trois banques de données indépendantes dans la zone argileuse. Les deux premières banques provenaient des travaux de P.N. Ray et collab. («Polymorphic-nondisjoint site index curves for black spruce of the Ontario Claybelt», Univ. of Toronto) et Horton et Groot (1987). La troisième banque provenait de données du réseau de parcelles-échantillons du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. Ces trois banques contiennent des données de croissance en hauteur obtenues par analyse destructive des tiges. Comme la hauteur dominante a été définie en fonction des 100 plus grands arbres ha^{-1} et que les parcelles mesuraient 10 m x 10 m, les comparaisons furent basées sur le plus grand arbre présent dans chaque parcelle.

RÉSULTATS

Pour des raisons pratiques et à cause de fréquences peu élevées de données dans quelques groupes opérationnels, quelques groupes opérationnels furent regroupés sur la base de similarité de leurs caractéristiques (figure 2): GO 5 et 8, GO 7 et 9, et GO 12 et 13. Le groupe opérationnel 11 fut laissé seul. Dans le reste du texte, les nouveaux groupes opérationnels ainsi créés seront désignés 5/8, 7/9 et 12/13, respectivement. La fonction de Weibull fut ajustée aux données de hauteur dominante des quatre GO créés en deux étapes. D'abord, la fonction fut ajustée pour chacun des groupes opérationnels de manière à ce qu'elle représente la tendance générale de croissance en hauteur dominante pour l'ensemble des parcelles. Ensuite, des séries de courbes pour chaque nouveau groupe opérationnel furent obtenues en faisant varier l'asymptote de la fonction de Weibull (figure 3 et tableau 3). La tendance de croissance de chaque parcelle-échantillon fut comparée à la hauteur dominante prédite calculée à partir des séries de courbes. S'il y avait des écarts importants entre les valeurs observées et prédites, les paramètres de la fonction de Weibull étaient réajustés en conséquence. Cette procédure fut répétée jusqu'à ce que les tendances de croissance en hauteur dominante de toutes les parcelles soient bien représentées par l'équation. Les fonctions ajustées pour chaque groupe opérationnel furent ensuite utilisées pour estimer l'indice de site des parcelles-échantillons qui n'avaient pas fait l'objet de mesure à l'âge de référence (50 ans). Par conséquent, cette approche impliqua le développement de courbes anamorphes pour chacun des nouveaux groupes opérationnels.

Pour chacune des cinq fonctions de productivité du site, l'inclusion des groupes opérationnels au moyen de variables factices fut significative (tableau 4). Les équations 5, 6, 7 et 8 représentaient beaucoup mieux les valeurs observées que l'équation 4. Tel que suggéré par Kvålseth (1985), le signe négatif du coefficient de détermination indique que l'équation 4 ne convenait pas à ce type de données. Des erreurs-types d'estimation plus basses furent obtenues avec les modèles contraints (équations 6, 7 et 8) comparativement aux autres modèles (équations 4 et 5). Les courbes de hauteur dominante produites par le meilleur modèle de chaque catégorie (équations 5 et 8) furent tracées pour chaque groupe opérationnel et pour différentes valeurs d'indice de site (figures 4 et 5). Même si l'équation 5 donnait un coefficient de détermination relativement élevé et une erreur-type de l'estimé relativement faible, elle n'a pas produit d'aussi bons résultats que l'équation 8. En effet, elle ne permettait pas de distinguer le GO 5/8 du GO 11 et

entraînait des écarts relativement grands entre la hauteur dominante à l'âge de référence et l'indice de site, notamment pour les valeurs faibles (figures 4 et 5).

Les hauteurs dominantes prédites par l'équation 8 furent comparées à celles observées des banques de données indépendantes (figure 6, a-d). Pour des raisons de concision, seul un sous-ensemble représentatif des arbres non supprimés fut sélectionné pour des indices de site faibles à élevés dans chaque groupe opérationnel. Dans la plupart des cas, l'écart entre les hauteurs dominantes prédites et observées était inférieur à 1 m. Des valeurs résiduelles supérieures à 1 m furent obtenues à certains âges seulement pour les GO 7/9 et 12/13. Cependant, dans tous les cas, toutes les hauteurs dominantes prédites représentaient bien les diverses tendances de croissance en hauteur dominante observées chez les différents groupes opérationnels pour des indices de site très variés.

	<ul style="list-style-type: none"> - Faible taux de décomposition - Plantes herbacées peu abondantes - Étage arbustif dominé par le thé du Labrador - Pauvres en éléments nutritifs - Peuplements dominés par l'épinette noire - Gradation topographique descendante 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux élevé de décomposition - Arbustes et plantes herbacées abondants - Riches en éléments nutritifs - Peuplements mixtes - Circulation des eaux souterraines
<ul style="list-style-type: none"> - Sols minéraux - Hautes terres 	Groupes opérationnels 5 et 8	Groupes opérationnels 7 et 9
<ul style="list-style-type: none"> - Sols organiques - Basses terres 	Groupe opérationnel 11	Groupes opérationnels 12 et 13

Figure 2. Similarités et différences entre les caractéristiques des groupes opérationnels (GO) analysés en vue de la fusion des GO 5 et 8, 7 et 9 ainsi que 12 et 13.

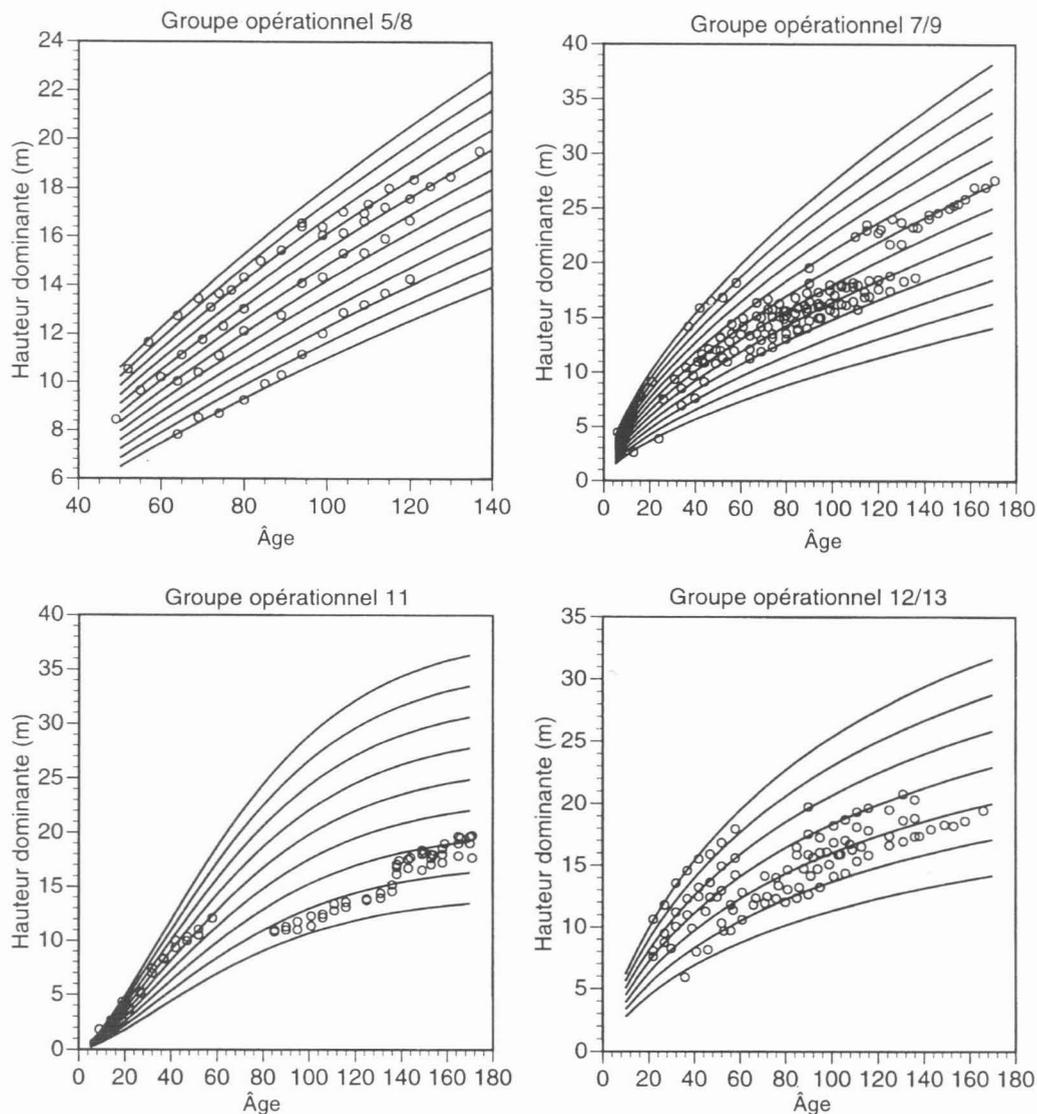


Figure 3. Hauteurs dominantes observées et fonction de Weibull ajustée pour chaque groupe opérationnel obtenu par regroupement.

Tableau 3. Paramètres de la fonction de Weibull $\left\{ \text{Hauteur} = b_0(1 - \exp^{-(b_1 \cdot \text{âge})^{b_2}}) \right\}$ calculés pour chaque groupe opérationnel

Groupe opérationnel	Paramètres			
	b_0		b_1	b_2
	Minimum	Maximum		
5/8	34,53731	56,53731	$3,38404 \times 10^{-3}$	0,88519
7/9	258,2006	698,2006	$6,58216 \times 10^{-5}$	0,64065
11	14,10571	38,10571	$1,27190 \times 10^{-2}$	1,45966
12/13	19,47148	43,47148	$8,35929 \times 10^{-3}$	0,75656

Tableau 4. Modèles de régression pour les fonctions de productivité de site

Équation de régression ^a	R ²	ET _E
(4) $H = \frac{0,68737S^{1,35869}}{(1 - \exp^{(-2,23034 - 0,11103\ln(\text{âge}) + (0,57333Z_5 + 0,53614Z_7 + 0,59629Z_{11} + 0,60221Z_{12})\ln(S))})}$	-0,44	5,3150
(5) $H = 4,40364S^{(0,93412Z_5 + 0,90995Z_7 + 0,94960Z_{11} + 0,88247Z_{12})} (1 \exp^{(-0,00419\text{âge})})^{0,75289}$	0,96	0,9133
(6) $H = S \frac{(1 - \exp^{\exp^{(-32,63982 + (0,76455Z_5 + 0,63544Z_7 + 0,77527Z_{11} + 0,53181Z_{12})\ln(\text{âge}) - 0,00212\ln(S))})})}{1 - \exp^{\exp^{(-32,63982 + (0,76455Z_5 + 0,63544Z_7 + 0,77527Z_{11} + 0,53181Z_{12})\ln(50) - 0,00212\ln(S))})}}$	0,98	0,6819
(7) $H = S \left\{ \frac{(1 - \exp^{(-(0,00754Z_5 + 0,00198Z_7 + 0,01308Z_{11} + 0,00720Z_{12}) \text{âge}))}}{(1 - \exp^{(-(0,00754Z_5 + 0,00198Z_7 + 0,01308Z_{11} + 0,00720Z_{12}) 50)})} \right\}^{(0,99628Z_5 + 0,00158Z_7 - 0,00597Z_{11} - 0,00731Z_{12})}$	0,98	0,5636
(8) $H = S \frac{(1 - \exp^{-((0,00745Z_5 + 0,00139Z_7 + 0,01086Z_{11} + 0,00805Z_{12}) \text{âge})^{(1,02311Z_5 + 0,70808Z_7 + 1,29923Z_{11} + 0,76670Z_{12})}})}{(1 - \exp^{-((0,00745Z_5 + 0,00139Z_7 + 0,01086Z_{11} + 0,00805Z_{12}) 50)^{(1,02311Z_5 + 0,70808Z_7 + 1,29923Z_{11} + 0,76670Z_{12})}})}$	0,98	0,5645

- ^a (4): basée sur la fonction utilisée par Monserud (1984b).
 (5): basée sur la fonction utilisée par Payandeh (1991b).
 (6): basée sur la fonction utilisée par Hann et Scrivani (1987).
 (7): basée sur la fonction de Richards.
 (8): basée sur la fonction de Weibull.

Note: H, hauteur dominante (en m); S, indice de site (en m) à l'âge de référence (50 ans); Z₅, Z₇, Z₁₁, Z₁₂, variables factices. Par exemple Z₅ = 1 pour le GO 5/8, Z₇ = 1 pour le GO 7/9, Z₁₁ = 1 pour le GO 11, et Z₁₂ = 1 pour le GO 12/13.

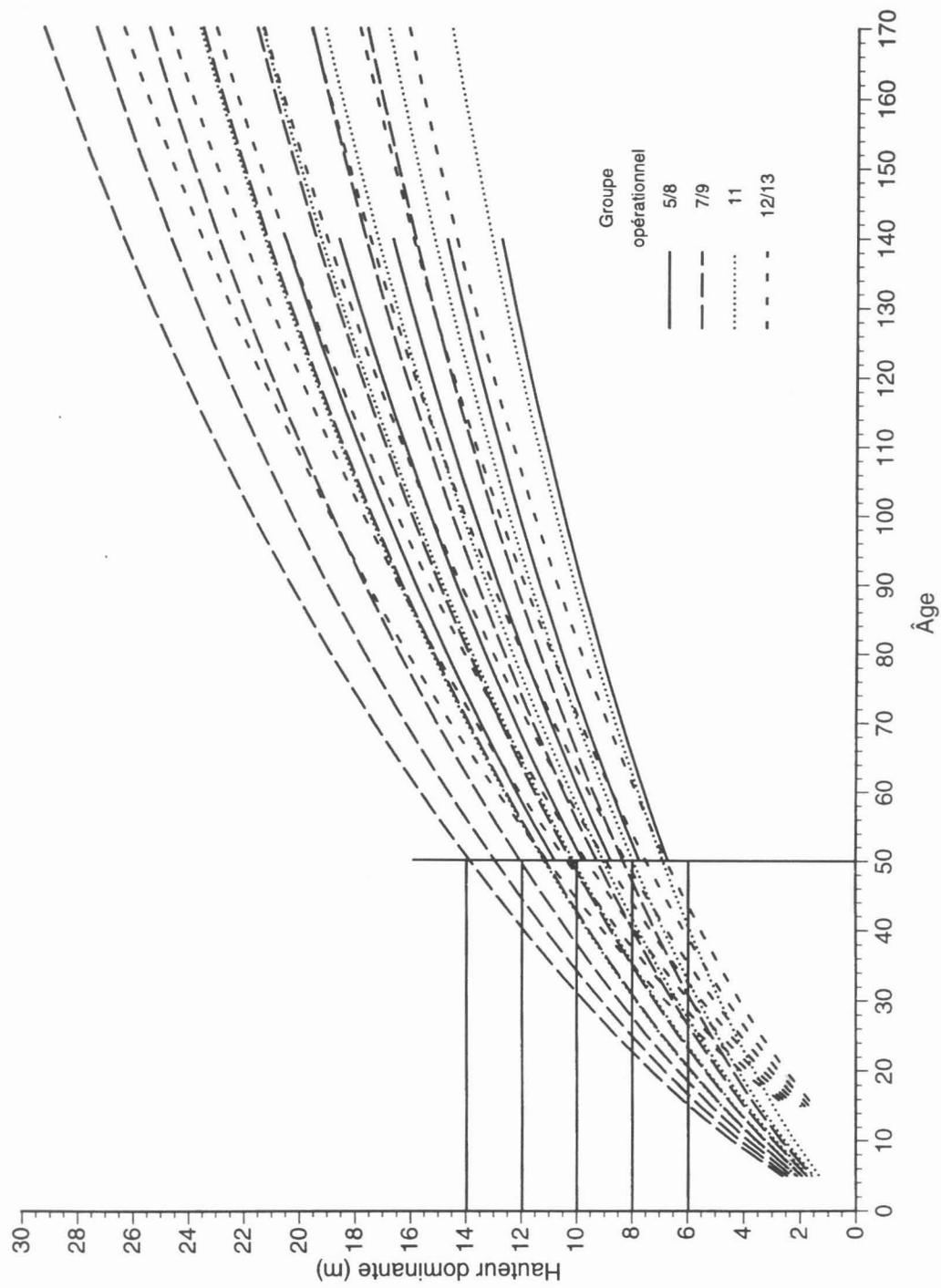


Figure 4. Courbes d'indice de site obtenues au moyen de la fonction utilisée par Payandeh (1991b) (équation 5).

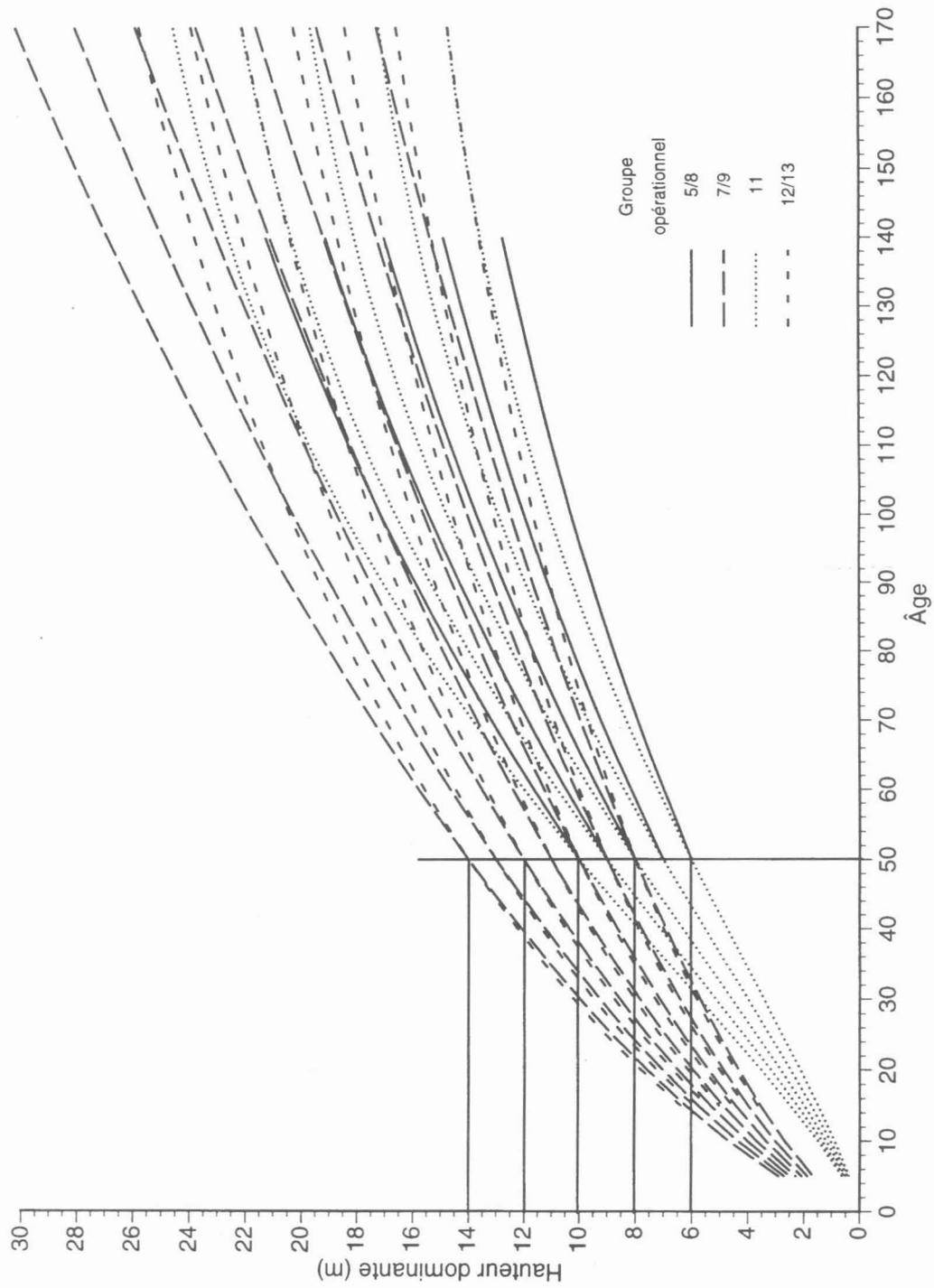


Figure 5. Courbes d'indice de site obtenues au moyen de la fonction basée sur la fonction de Weibull (équation 8).

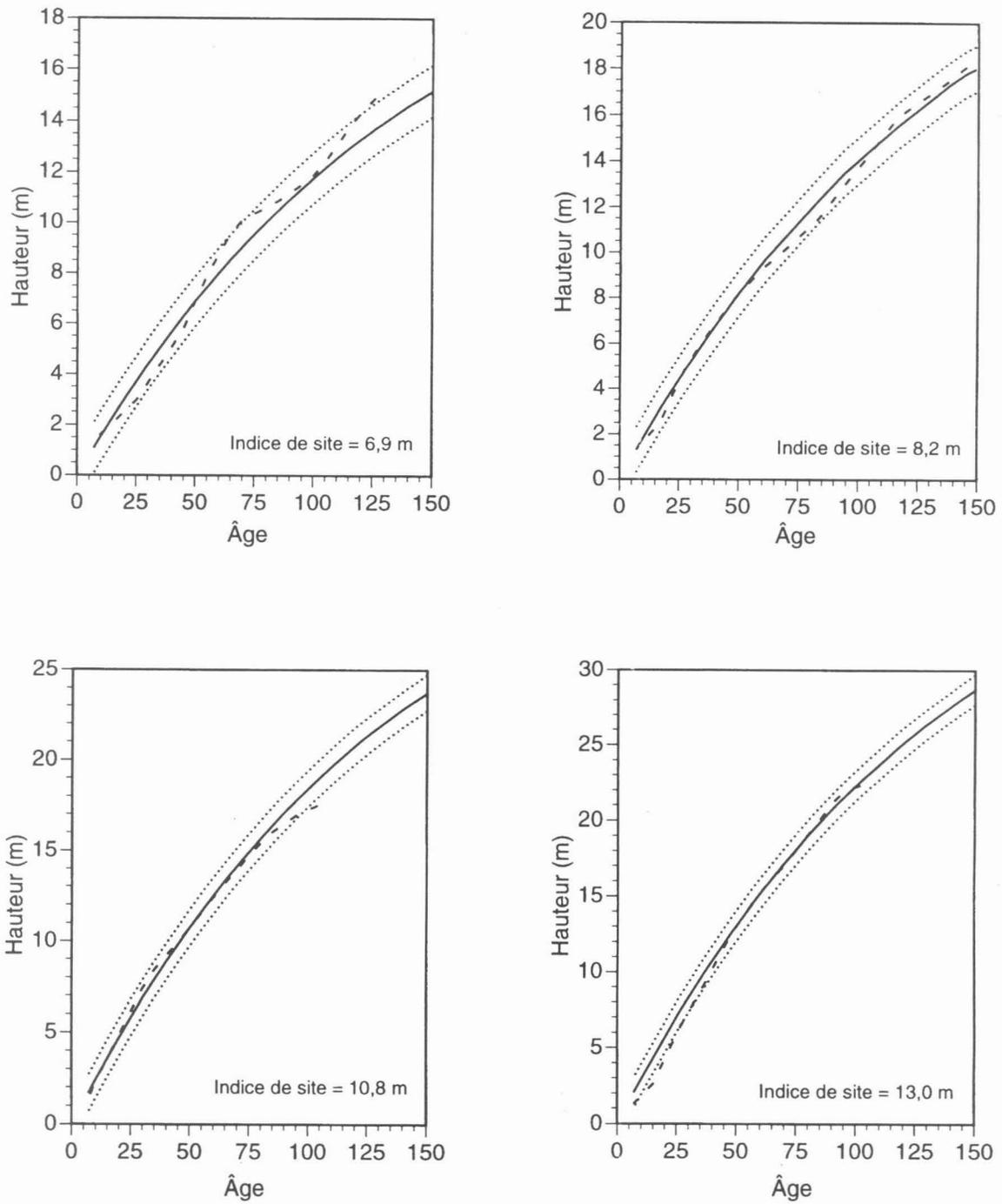


Figure 6a. Comparaison entre les hauteurs dominantes observées (- - -) et prédites (—) pour le groupe opérationnel 5/8 (..... : limites de l'intervalle de ± 1 m pour les valeurs prédites).

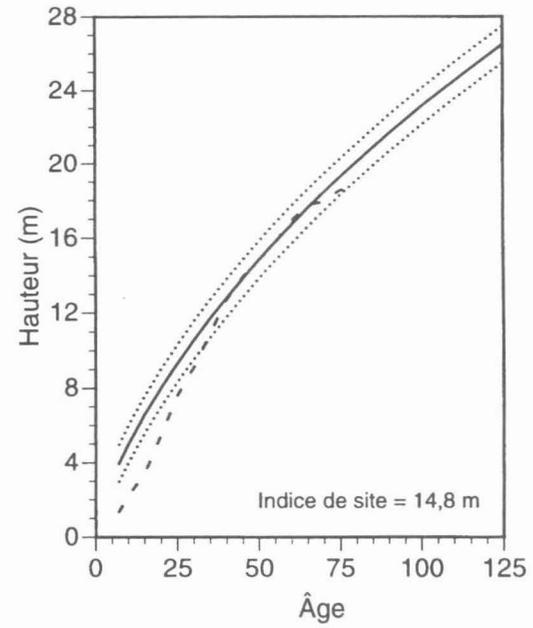
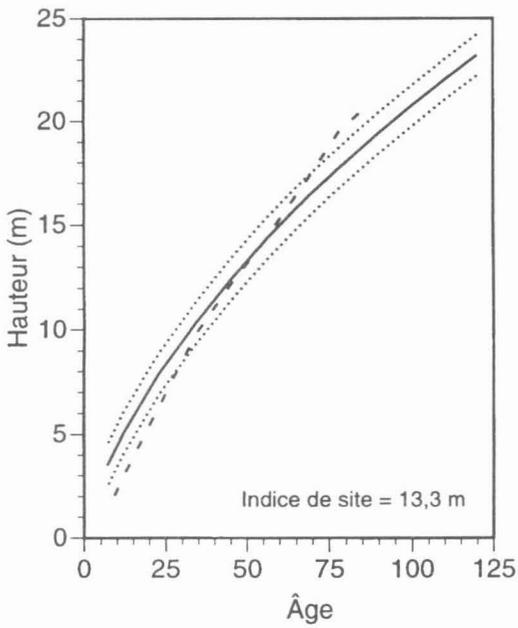
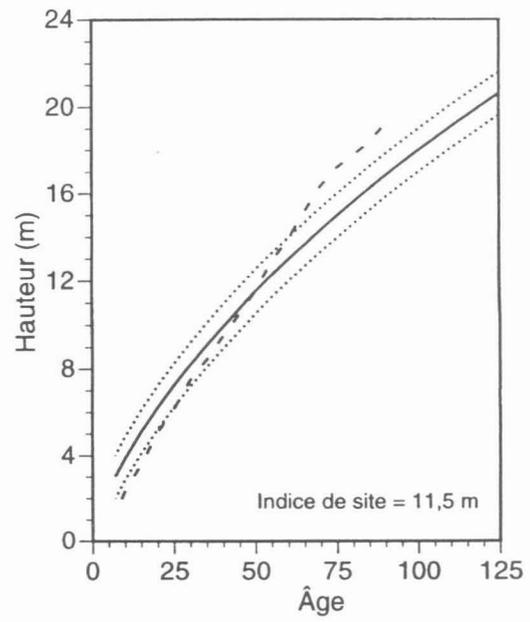
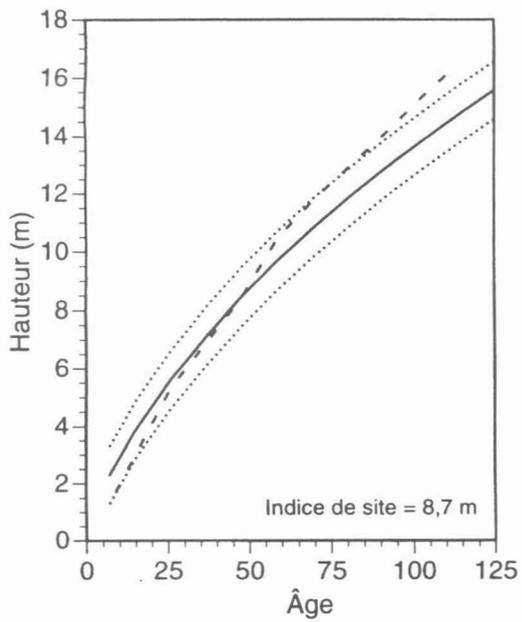


Figure 6b. Comparaison entre les hauteurs dominantes observées (---) et prédites (—) pour le groupe opérationnel 7/9 (..... : limites de l'intervalle de ± 1 m pour les valeurs prédites).

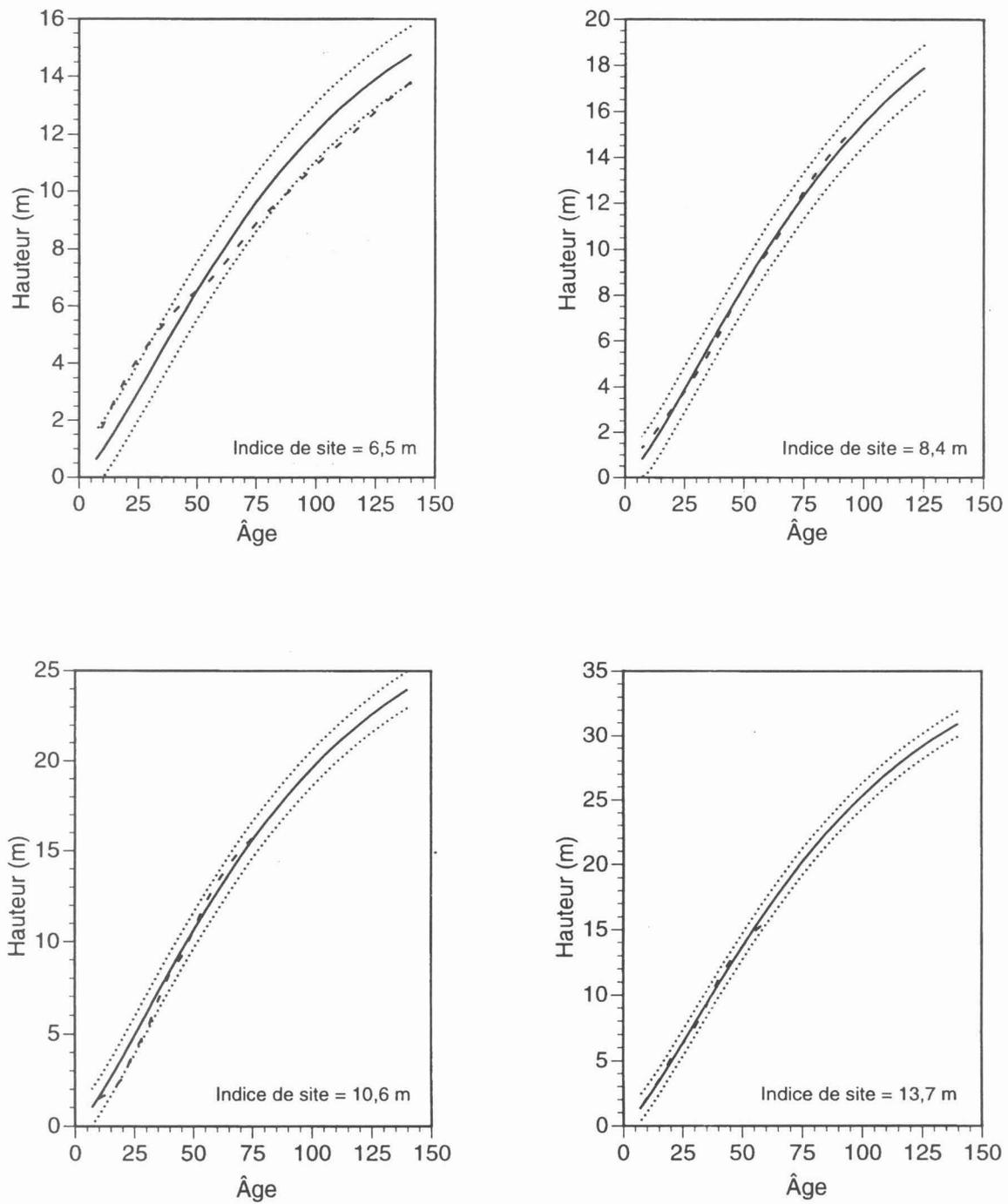


Figure 6c. Comparaison entre les hauteurs dominantes observées (- - -) et prédites (—) pour le groupe opérationnel 11 (····· : limites de l'intervalle de ± 1 m pour les valeurs prédites).

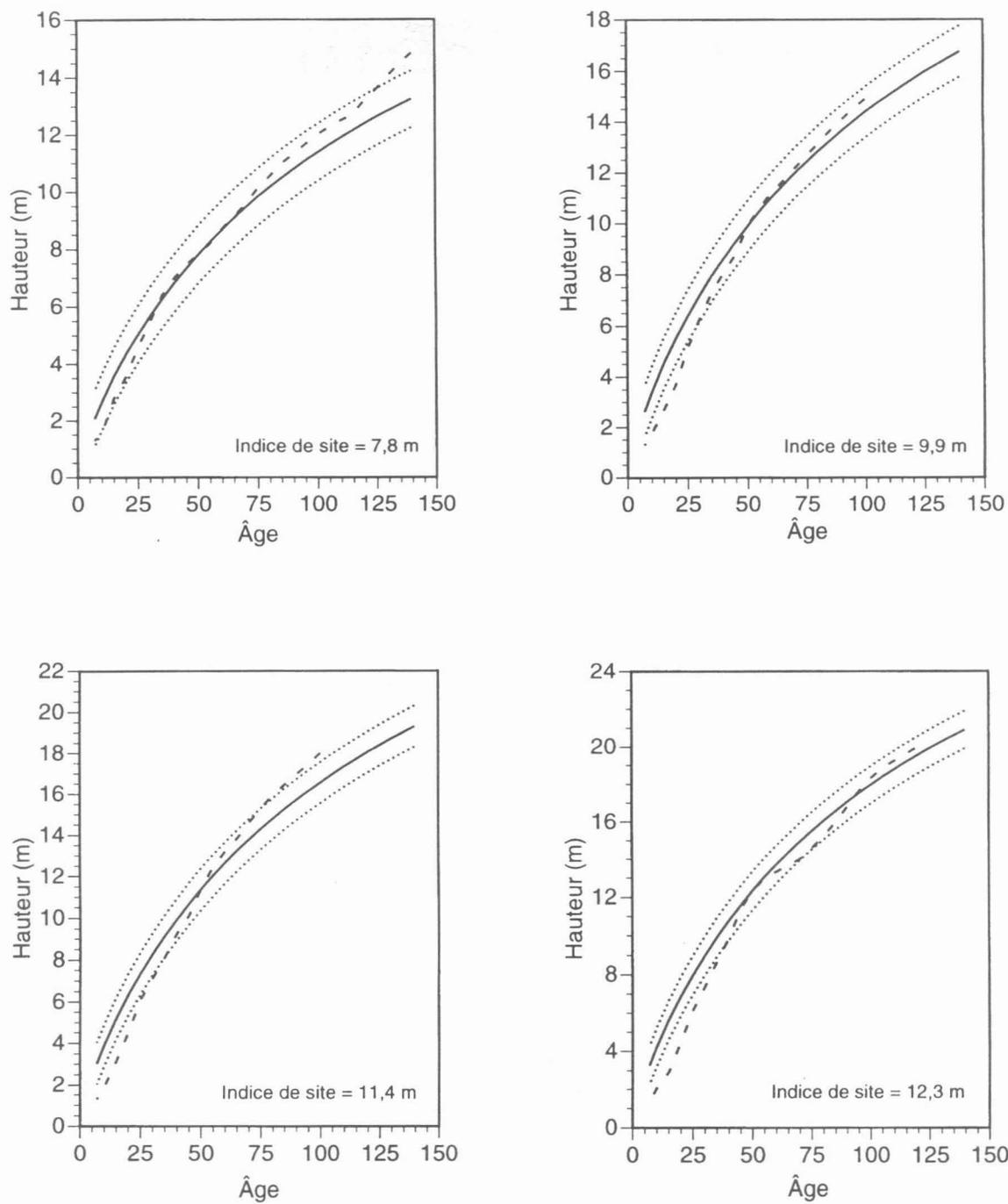


Figure 6d. Comparaison entre les hauteurs dominantes observées (- - -) et prédites (—) pour le groupe opérationnel 12/13 (..... : limites de l'intervalle de ± 1 m pour les valeurs prédites).

DISCUSSION

La comparaison des tendances de croissance en hauteur à long terme des groupes opérationnels suggère un modèle polymorphe (figures 4 et 5). Même si certains groupes opérationnels présentaient à 50 ans des indices de site très semblables, leurs productivités étaient très différentes au-delà de cet âge de référence. Ceci indique que la stratification des peuplements selon divers groupes écologiques était justifiée. De plus, cette approche constitue une manière efficace de représenter les différences résultant des caractéristiques écologiques propres à chaque groupe opérationnel. Aussi, il s'agit d'une approche plus pragmatique que celle qui consiste à établir des relations entre l'indice de site et plusieurs paramètres environnementaux, comme la teneur du sol en éléments nutritifs et les facteurs climatiques. On peut considérer deux raisons pour expliquer ces résultats. Premièrement, la mesure de tous les facteurs environnementaux associés à la croissance peut s'avérer dispendieuse et requérir beaucoup de temps. Deuxièmement, les travaux réalisés jusqu'ici n'ont pas permis de développer des modèles robustes représentant les interactions complexes entre les facteurs environnementaux et l'indice de site (p. ex. : Payandeh, 1986; Brown et Marquard, 1988; Walters et collab., 1990; Klinka et Carter, 1990; Monserud et collab., 1990; Gale et collab., 1991; Tamminen, 1993). Même si un bon ajustement fut obtenu avec l'équation 5, celle-ci ne permettait pas de distinguer les groupes opérationnels aussi nettement que les équations 7 et 8. Pour cette raison, et parce que l'équation 5 produisait des écarts relativement grands entre l'indice de site et la hauteur dominante à 50 ans, il semble préférable de contraindre les fonctions de manière à satisfaire la condition que la hauteur dominante soit égale à l'indice de site à l'âge de référence en vue de représenter plus fidèlement les différences entre les types forestiers quant à leurs tendances de développement en hauteur à long terme.

Le polymorphisme résultant des différents groupes opérationnels peut s'expliquer par leurs caractéristiques écologiques (Jones et collab., 1983). La tendance de croissance en hauteur obtenue pour le GO 7/9 sera utilisée comme base de comparaison puisque ce groupe est perçu comme représentant les régimes d'humidité et d'éléments nutritifs optimaux pour l'épinette noire (p. ex. : Lowry, 1975; Viereck et Johnston, 1990). Même si le GO 7/9 présente des conditions de drainage et de nutrition supérieures à celles du GO 5/8 (tableau 2 et figure 2), ce dernier est

caractérisé par une productivité plus élevée après l'âge de référence pour les mêmes valeurs d'indice de site (figure 5). Cette tendance peut être imputée à la compétition intense de la part d'autres espèces dans le cas du GO 7/9, qui se compose de peuplements mixtes alors que le GO 5/8 est dominé par l'épinette noire (tableau 2 et figure 2). Un examen détaillé de la littérature n'a résulté qu'en peu d'évidence tangible d'interactions compétitives entre d'une part l'épinette noire et d'autre part l'épinette blanche, le sapin baumier, le peuplier baumier et le bouleau à papier. Newton et Smith (1991), par exemple, ont conclu que le sapin baumier n'avait aucun effet significatif sur la croissance de l'épinette noire. Cependant, les travaux de Payandeh (1984 et 1991a) suggèrent que l'épinette blanche, le peuplier baumier et le peuplier faux-tremble puissent nuire à la croissance de l'épinette noire à cause de leurs taux de croissance plus rapides en dhp et en hauteur.

La productivité relativement faible du GO 11 en jeune âge suggère que les semis croissaient dans des conditions pauvres, ce qui est conforme aux observations de Munson et Timmer (1989). En effet, ce groupe opérationnel est constitué d'un sol organique avec horizon fibrique épais et peu décomposé avec faible ruissellement souterrain. Les études de Lieffers et Rothwell (1986) et de Czapowskyj et collab. (1986) suggèrent l'une et l'autre que la faible profondeur de la nappe phréatique nuit probablement à la croissance des semis dans cet écosystème. Bien que l'étendue des interactions de type compétitif n'ait pas été étudiée, il est probable que l'établissement et la croissance des semis d'épinette noire soient aussi inhibés par la présence du thé du Labrador (*Ledum groenlandicum* Retzius). À cet égard, les travaux de Chapin (1983) ainsi que Grigal et collab. (1985), entre autres, indiquent que cet arbuste croît beaucoup plus rapidement que les semis d'épinette noire. Chapin (1985) a notamment constaté que le thé du Labrador produit une biomasse foliaire et absorbe les éléments nutritifs plus rapidement que l'épinette noire.

Même si le GO 12/13 est constitué de sols organiques pouvant être défavorables à l'épinette noire (Jeglum, 1974; Lowry, 1975; Payandeh, 1978), sa productivité relativement élevée telle qu'indiquée par la croissance en hauteur peut s'expliquer par une bonne circulation des eaux souterraines dans l'écosystème, assurant par le fait même un bon apport en éléments nutritifs et des conditions aérobies favorables à la croissance, et possiblement par la présence d'aulne

fixateur d'azote. Sa productivité est demeurée voisine de celle du GO 7/9 jusqu'à 50 ans, puis a commencé à décliner. Pour des valeurs égales d'indice de site, le GO 12/13 présentait une productivité moindre que le GO 11. Ceci peut être attribué (1) aux limites imposées à la profondeur d'enracinement des plus vieux arbres et (2) à la densité des peuplements. En effet, par rapport aux autres groupes opérationnels, le GO 12/13 se caractérise par une profondeur d'enracinement relativement superficielle à cause des fluctuations de la nappe phréatique. Les peuplements sont généralement moins denses et tendent à se morceler facilement suite aux chablis (Smith et collab., 1987). Les arbres du GO 11 résistent mieux au chablis à cause de leur enracinement plus profond et de la présence d'un horizon fibrique épais, ces deux facteurs contribuant à la stabilité du peuplement.

L'hypothèse de proportionnalité à l'intérieur de chaque groupe opérationnel était valide pour les gammes d'âges considérées. Par conséquent, les modèles obtenus incorporaient à la fois une approche polymorphe permettant d'expliquer les tendances résultant des différences entre les groupes opérationnels et une démarche anamorphe représentant la variabilité à l'intérieur de chaque groupe.

La comparaison graphique des hauteurs dominantes prédites par l'équation 8 avec celles obtenues à partir des banques de données indépendantes était satisfaisante. Dans la plupart des cas, les écarts relativement grands entre les valeurs prédites et observées survenaient à un âge avancé. Même si des écarts relativement grands furent observés dans certains cas à des âges jeunes et avancés, les hauteurs dominantes observées suivaient la tendance calculée à partir de l'équation 8. Comme mentionné précédemment, la figure 6 ne montre qu'un sous-ensemble de la base de données. Hormis le cas d'arbres supprimés dans leur jeune âge, les autres

valeurs de hauteur dominante obtenues à partir des banques de données indépendantes concordaient généralement avec les valeurs prédites par l'équation 8. Les écarts plus importants entre les hauteurs prédites et observées obtenus dans le cas d'arbres supprimés indiquent qu'il faut choisir avec soin les arbres dominants devant servir à l'évaluation de la productivité du site en examinant en détail l'histoire du peuplement (Montserud, 1984a).

CONCLUSIONS

L'intégration de données écologiques de base à des courbes polymorphes d'indice de site permet d'expliquer adéquatement la tendance de la croissance dans chaque groupe opérationnel. Cette approche offre donc une façon à la fois commode et efficace d'intégrer des caractéristiques écologiques aux fonctions d'indice de site. Elle comporte une seule exigence supplémentaire : il faut préciser à quel groupe opérationnel appartient chaque peuplement dont on veut évaluer la productivité potentielle. La démarche permet cependant une meilleure estimation de la tendance à long terme de la croissance en hauteur.

REMERCIEMENTS

Les données ont été fournies par la société Spruce Falls Power and Paper Company Ltd., de Kapuskasing (Ontario), au Canada. Nous voulons également remercier D. Burgess et S. Magnussen pour leurs recommandations faites lors de la révision d'une version antérieure du manuscrit.

OUVRAGES CONSULTÉS

- Alemdag, I.S. 1988. Site index equations for white spruce in the Northwest Territories, Canada. *For. Ecol. Manage.* 23:61-71.
- Alemdag, I.S. 1991. National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada. *Can. J. For. Res.* 21:1466-1474.
- Amateis, R.L.; Burkhart, H.E. 1985. Site index curves for loblolly pine plantations on cutover site-prepared lands. *South. J. Appl. For.* 9:166-169.
- Bailey, R.L.; Clutter, J.L. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 20:155-159.
- Biging, G.S. 1985. Improved estimates of site index curves using a varying-parameter model. *For. Sci.* 31:248-259.
- Borders, B.E.; Bailey, R.L.; Ware, K.D. 1984. Slash pine site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic difference method. *For. Sci.* 30:411-423.
- Brown, J.H.; Marquard, R.D. 1988. Site index of yellow-poplar in relation to soils and topography in the Allegheny Plateau of Ohio. *North. J. Appl. For.* 5:34-38.
- Burkhart, H.E.; Tennent, R.B. 1977. Site index equations for radiata pine in New Zealand. *N. Z. J. For. Sci.* 7:408-416.
- Cao, Q.V. 1993. Estimating coefficients of base-age-invariant site index equations. *Can. J. For. Res.* 23:2343-2347.
- Cao, Q.V.; Durand, K.M. 1991. Site index curves for eastern cottonwood plantations in the Lower Mississippi Delta. *South. J. Appl. For.* 15:28-30.
- Carmean, W.H. 1968. Tree height-growth patterns in relation to soil and site. Pages 499-512 in *Tree growth and forest soils*. 3rd N. Am. Forest Soils Conf. Proc., Oregon State University Press, Corvallis.
- Carmean, W.H. 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States. *For. Sci.* 18:109-120.
- Carmean, W.H. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Adv. Agron.* 27:209-269.
- Chapin, F.S., III. 1983. Nitrogen and phosphorus nutrition and nutrient cycling by evergreen and deciduous understory shrubs in an Alaskan black spruce forest. *Can. J. For. Res.* 13:773-781.
- Cieszewski, C.J.; Bella, I.E. 1989. Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. *Can. J. For. Res.* 19:1151-1160.
- Clutter, J.L.; Fortson, J.C.; Pienaar, L.V.; Brister, G.H.; Bailey, R.L. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. John Wiley & Sons, New York.
- Cornell, J.A.; Berger, R.D. 1987. Factors that influence the value of the coefficient of determination in simple linear and nonlinear regression models. *Phytopathology* 77:63-70.
- Corns, I.G.W.; Pluth, D.J. 1984. Vegetational indicators as independent variables in forest growth prediction in west-central Alberta, Canada. *For. Ecol. Manage.* 9:13-25.
- Curtis, R.O.; Diaz, N.M.; Clendenen, G.W. 1990. Height growth and site index curves for western white pine (*Pinus monticola*) in the Cascade range of Washington and Oregon. *USDA For. Serv. Res. Pap. PNW-RP-423*.
- Czapowskyj, M.M.; Rowke, R.V.; Grant, W.J. 1986. Growth and nutrient status of black spruce seedlings as affected by water table depth. *USDA For. Serv. Res. Pap. NE-RP-591*.
- Daniel, T.W.; Helms, J.A.; Baker, F.S. 1979. *Principles of silviculture*. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Dolph, K.L. 1987. Site index curves for young-growth California white fir on the western slopes of the Sierra Nevada. *USDA For. Serv. Res. Pap. PSW-185*.
- Dolph, K.L. 1991. Polymorphic site index curves for red fir [*Abies magnifica*] in California and southern Oregon. *USDA For. Serv. Res. Pap. PSW-206*.
- Gale, M.R.; Grigal, D.F.; Harding, R.B. 1991. Soil productivity index: predictions of site quality for white spruce plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1701-1708.
- Gilmore, D.W.; Briggs, R.D.; Seymour, R.S. 1993. Stem volume and site index equations for European larch in Maine. *North. J. Appl. For.* 10:70-74.

- Goelz, J.C.G.; Burk, T.E. 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 22: 776-784.
- Golden, M.S.; Meldahl, R.; Knowe, S.A.; Boyer, W.D. 1981. Predicting site index for old-field loblolly pine plantations. *South. J. Appl. For.* 5:109- 114.
- Gordon, A.M.; Williams, P.A.; Taylor, E.P. 1989. Site index curves for Norway spruce in Southern Ontario. *North. J. Appl. For.* 6:23-26.
- Graney, D.L.; Burkhart, H.E. 1973. Polymorphic site index curves for Shortleaf Pine in the Ouachita mountains. USDA For. Serv. Res. Pap. SO-85.
- Green, R.N., Marshall, P.L., and Klinka, K. 1989. Estimating site index of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) from ecological variables in southwestern British Columbia. *For. Sci.* 35:50-63.
- Grigal, D.F.; Buttleman, C.G.; Kernik, L.K. 1985. Biomass and productivity of the woody strata of forested bogs in northern Minnesota. *Can. J. Bot.* 63:2416-2424.
- Hacker, W.D.; Bilan, M.V. 1991. Site index curves for loblolly and slash pine plantations in the post oak belt of east Texas. *South. J. Appl. For.* 15:97-100.
- Hann, D.W.; Scrivani, J.A. 1987. Dominant-height-growth and site-index equations for Douglas-fir and ponderosa pine in southwest Oregon. Oregon State University, Forest Research Laboratory, Res. Bull. 59.
- Horton, B.J.; Groot, A. 1987. Development of second-growth black spruce stands on peatlands in northeastern Ontario. Canada-Ontario Forest Resource Development Agreement, Internal report.
- Huang, S. 1994. Ecologically based reference-age invariant polymorphic height growth and site index curves for white spruce in Alberta. Alberta Environmental Protection Land and Forest Services, Forest Management Division, Technical Report Pub. No. T/308.
- Jeglum, J.K. 1974. Relative influence of moisture-aeration and nutrients on vegetation and black spruce growth in northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 4:114-126.
- Jones, R.K.; Pierpoint, G.; Wickware, G.M.; Jeglum, J.K.; Arnup, R.W.; Bowles, J.M. 1983. Field guide to forest ecosystem classification for the clay belt, site region 3e. Ont. Min. Nat. Resour., Toronto, Ontario.
- Ker, M.F.; Bowling, C. 1991. Polymorphic site index equations for four New Brunswick softwood species. *Can. J. For. Res.* 21:728-732.
- Klinka, K.; Carter, R.E. 1990. Relationships between site index and synoptic environmental factors in immature coastal Douglas-fir stands. *For. Sci.* 36:815-830.
- Kvålseth, T.O. 1985. Cautionary note about R^2 . *Am. Stat.* 39:279-285.
- Lieffers, V.J.; Rothwell, R.L. 1986. Effects of depth of water table and substrate temperature on root and top growth of *Picea mariana* and *Larix laricina* seedlings. *Can. J. For. Res.* 16:1201-1206.
- Lowry, G.L. 1975. Black spruce site quality as related to soil and other site conditions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:125-131.
- Monserud, R.A. 1984a. Problems with site index: an opinionated review. Pages 167-180 in *Forest land classification: experiences, problems, perspectives: Symposium Proceedings. Edited by J. Bockheim.* Department of Soil Science, University of Wisconsin, Madison, WI.
- Monserud, R.A. 1984b. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *For. Sci.* 30:943-965.
- Monserud, R.A. 1985. Applying height growth and site index curves for inland Douglas-fir. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-347.
- Monserud, R.A.; Moody, U.; Breuer, D.W. 1990. A soil-site study for inland Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 20:686-695.
- Munson, A.D.; Timmer, V.R. 1989. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. I. Early performance. *Can. J. For. Res.* 19:162-170.
- Newnham, R.M. 1988. A modification of the Ek-Payandeh nonlinear regression model for site index curves. *Can. J. For. Res.* 18:115-120.
- Newton, P.F. 1992. Base-age invariant polymorphic site index curves for black spruce and balsam fir within central Newfoundland. *North. J. Appl. For.* 9:18-22.
- Newton, P.F.; Smith, V.G. 1991. Volume growth relationships within mixed black-spruce/balsam-fir stands. *For. Ecol. Manage.* 40:131-136.
- Nieppola, J. 1993. Understorey plants as indicators of site productivity in *Pinus sylvestris* L. stands. *Scand. J. For. Res.* 8:49-65.

- Payandeh, B. 1978. A site index formula for peatland black spruce in Ontario. *For. Chron.* 54:39-41.
- Payandeh, B. 1984. Dimensional relationships for several tree species from the spruce-fir forest types of northwestern Ontario. *Can. For. Serv. Res. Notes* 4:18-20.
- Payandeh, B. 1986. Predictability of site index from soil factors and lesser vegetation in northern Ontario forest types. *Can. For. Serv., Inf. Rep. O-X-373*.
- Payandeh, B. 1991a. Plonski's (metric) yield tables formulated. *For. Chron.* 67:545-546.
- Payandeh, B. 1991b. Composite site-productivity functions for northeastern Ontario black spruce. *New For.* 5:1-12.
- Payandeh, B.; Wang, Y. 1994. Relative accuracy of a new base-age invariant site index model. *For. Sci.* 40:341-348.
- Phillips, G.B. 1992. Development of site index curves for *Eucalyptus rubida* Deane et Maiden growing in Lesotho. *Commonw. For. Rev.* 71:197-202.
- Quenet, R.V.; Manning, G.H. 1990. Site index equations for black spruce and white spruce in the Yukon. *For. Can. Pacific For. Cent. Inf. Rep. BC-X-317*.
- Rayner, M.E. 1991. Site index and dominant height growth curves for regrowth karri (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell.) in south-western Australia. *For. Ecol. Manage.* 44:261-283.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10:290-300.
- Schmoldt, D.L.; Martin, G.L.; Bockheim, J.G. 1985. Yield-based measures of northern hardwood site quality and their correlation with soil-site factors. *For. Sci.* 31:209-219.
- Smith, V.G. 1984. Asymptotic site-index curves, fact or artifact? *For. Chron.* 60:150-156.
- Smith, V.G.; Watts, M.; James, D.F. 1987. Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 17: 1080- 1091.
- Stansfield, W.F.; McTague, J.P.; Lacapa, R. 1991. Dominant-height and site-index equations for ponderosa pine in east-central Arizona. *Can. J. For. Res.* 21:606-611.
- Steinbrenner, E.C. 1979. Forest soil productivity relationships. Pages 199-222 in *Forest soils of the Douglas-fir region. Edited by P.E. Heilman, H.W. Anderson, and D.M. Baumgartner.* Washington State University, Cooperative Extension Service, Pullman.
- Strong, W.L.; Pluth, D.J.; LaRoi, G.H.; Corns, I.G.W. 1991. Forest understory plants as predictors of lodgepole pine and white spruce site quality in west-central Alberta. *Can. J. For. Res.* 21:1675-1683.
- Tamminen, P. 1993. Estimation of site index for Scots pine and Norway spruce stands in South Finland using site properties. *Folia For.* 819.
- Viereck, L.A.; Johnston, W.F. 1990. *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. - black spruce. Pages 227-237 in *Silvics of North America: 1. Conifers. Coordinated by R.M. Burns, and B.H. Honkala.* USDA For. Serv., Agriculture Handbook 654, Vol. 1.
- Walters, D.K.; Sloan, J.P.; Kurmis, V. 1990. Aspen site index as related to plant indicators. Pages 337-340 in *Aspen Symposium '89 - Proceedings, 25-27 July 1989, Duluth, Minnesota. Edited by R.D. Adams.* USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-40.
- Wang, G.G.; Marshall, P.L.; Klinka, K. 1994. Height growth pattern of white spruce in relation to site quality. *For. Ecol. Manage.* 68:137-147.
- Wang, Q.; Wang, G.G.; Coates, K.D.; Klinka, D. 1994. Use of site factors to predict lodgepole pine and interior spruce site index in the sub-boreal spruce zone. *British Columbia Ministry of Forests, Research Note No. 114.*
- Williams, P.A.; Gordon, A.M.; Taylor, E.P. 1990. Site index curves and site factors affecting the growth of white pine in southern Ontario. *North. J. Appl. For.* 7:183-186.
- Yang, R.C.; Kozak, A.; Smith, J.H.G. 1978. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves. *Can. J. For. Res.* 8:424-431.
- Zahner, R. 1962. Loblolly pine site curves by soil groups. *For. Sci.* 8:104-110.



Canada

 Ontario