



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



Calibration du modèle de simulation « Forest Vegetation Simulator » (FVS^{Ontario}) pour l'Ontario

Projet numéro 130-107

Valérie Lacerte, Guy R. Larocque

Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides
Québec (Québec)

Murray Woods

Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
Section des sciences et de l'information du Centre-Sud
North Bay (Ontario)

W. John Parton

Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
Section des sciences et de l'information du Nord-Est
South Porcupine (Ontario)

**Rapport d'information LAU-X-132F
2008**

Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides

Canada

Calibration du modèle de simulation « Forest Vegetation Simulator » (FVS^{Ontario}) pour l'Ontario

Projet numéro 130-107

Valérie Lacerte, Guy R. Larocque

Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides
Québec (Québec)

Murray Woods

Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
Section des sciences et de l'information du Centre-Sud
North Bay (Ontario)

W. John Parton

Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario
Section des sciences et de la technologie du Nord-Est
South Porcupine (Ontario)

Rapport d'information LAU-X-132F

2008

Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides

CATALOGAGE AVANT PUBLICATION DE BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES CANADA

Calibration du modèle de simulation « Forest Vegetation
Simulator » (FVS^{Ontario}) pour l'Ontario [Ressource électronique] / V.
Lacerte... [et al.].

(Rapport d'information, 0835-1589; LAU-X-132)

Monographie électronique en version PDF.

Mode d'accès : World Wide Web.

Publ. aussi en anglais sous le titre : Forest Vegetation Simulator
model calibration for Ontario (FVS^{Ontario})

ISBN 978-0-662-07681-0

No de cat. : Fo113-3/132F-PDF

1. FVS Ontario (Fichier d'ordinateur).
2. Arbres – Croissance – Mesure.
3. Arbres – Croissance – Simulation par ordinateur.
4. Dendrométrie.
5. Foresterie – Simulation par ordinateur.
6. Forêts – Gestion – Ontario.
7. Écologie forestière – Ontario.
- I. Lacerte, V. (Valérie)
- II. Centre de foresterie des Laurentides
- III. Coll. : Rapport d'information (Centre de foresterie des
Laurentides : En ligne); LAU-X-132.

SD555.V3414 2008

634.9'285

C2007-980270-2

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada 2008

Numéro de catalogue Fo113-3/132F-PDF

ISBN 978-0-662-07681-0

ISSN 0835-1589

Cette publication est disponible sans frais en format PDF sur le site Web de la Librairie du Service canadien des
forêts : <http://librairie.scf.rncan.gc.ca>

ATS : (613) 996-4397 (appareil de télécommunication pour sourds).

This publication is also available in English under the title "Forest Vegetation Simulator model calibration for
Ontario (FVS^{Ontario})" (Catalog No. Fo113-3/132E-PDF).

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ / ABSTRACT	iv
INTRODUCTION	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES	1
Calcul des variables dépendantes et indépendantes	2
Dérivation de modèles	7
Analyse de la cohérence biologique	8
RÉSULTATS ET DISCUSSION	9
Description des nouveaux modèles	9
Taux de croissance en dhp	9
Taux de survie	9
Hauteur en fonction du dhp	9
Indice de densité de groupe d'espèces	9
Taux de croissance en dhp et en hauteur pour les petits arbres	10
Analyse de cohérence biologique	12
Modèles de taux de croissance en dhp	12
Modèles de taux de survie	15
Modèles de hauteur en fonction du dhp	15
Modèles d'indice de densité de groupe d'espèces	15
Modèles de croissance en hauteur pour les petits arbres	15
Modèles de croissance en dhp pour les petits arbres	16
Suggestions pour de futures orientations dans l'étalonnage de FVS ^{Ontario}	16
Manque de données pour l'étalonnage	16
Étalonnage de groupes d'espèces	17
Données supplémentaires souhaitables pour les espèces déjà étalonnées	17
Recommandations pour la modélisation sylvicole	17
CONCLUSION	18
REMERCIEMENTS	19
RÉFÉRENCES	19
LISTE DES ANNEXES	
Annexe 1. Exemple d'un programme SAS utilisé pour dériver les différents modèles	20
Annexe 2. Résumé des nouveaux modèles pour FVS ^{Ontario}	21
Annexe 3. Analyse de cohérence biologique pour les modèles de taux de croissance en dhp	25
Annexe 4. Analyse de cohérence biologique pour les modèles de taux de survie	44
Annexe 5. Analyse de cohérence biologique des modèles de hauteur en fonction du dhp	56
Annexe 6. Analyse de cohérence biologique des modèles de l'indice de densité de groupe d'espèces	71
Annexe 7. Analyse de cohérence biologique pour des modèles de taux de croissance en hauteur pour les petits arbres	79
Annexe 8. Analyse de cohérence biologique pour des modèles de taux de croissance en dhp pour les petits arbres	83
LISTE DES TABLEAUX	
Tableau 1. Résumé des données utilisées pour la calibration de FVS ^{Ontario}	3
Tableau 2. Formules de modèles de base utilisées pour développer les modèles de prévision du taux de croissance en dhp, du taux de survie, de la hauteur des tiges et du IDGE (indice de densité de groupe d'espèces) pour FVS ^{Ontario} comme fonction de différentes variables d'arbre et de peuplement	8
Tableau 3. Comparaison des résidus moyens des nouveaux modèles étalonnés et des résidus moyens calculés à l'aide des modèles originaux de FVS	10

RÉSUMÉ

Le modèle de simulation « Forest Vegetation Simulator » ou FVS^{Ontario}, issu de la variante géographique LS-TWIGS de FVS, a été calibré pour 19 espèces de la région forestière boréale et de la région des Grands Lacs–Saint-Laurent en Ontario. De nouveaux modèles de croissance et de rendement ont été élaborés à partir des données de placettes-échantillons permanentes situées dans ces régions. Ces nouveaux modèles ont été créés pour les variables dépendantes suivantes : taux de croissance en dhp (diamètre à hauteur de poitrine), taux de survie, hauteur des tiges en fonction du dhp et indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) pour les grands arbres (7,5 cm et plus au dhp), et taux de croissance en hauteur et en dhp pour les petits arbres (moins de 7,5 cm au dhp). Généralement, les résidus moyens des nouveaux modèles FVS^{Ontario} étaient plus petits que les résidus moyens des modèles LS-TWIGS originaux de FVS, ce qui signifie que les nouveaux modèles ont donné une représentation plus précise des effets de la variation régionale sur l'indice de site, la densité de peuplement et l'âge pour la plupart des espèces. De plus, l'analyse de cohérence biologique a révélé que toutes les variables dépendantes ont varié de façon logique en fonction des changements de l'indice de site, la densité de peuplement, la surface terrière ou l'âge.

ABSTRACT

The FVS^{Ontario} (Forest Vegetation Simulator) model, which originated from the Lake States-TWIGS geographic variant of FVS, was calibrated for 19 species of the boreal and Great Lakes–St. Lawrence forest regions of Ontario. New growth and yield models were derived using data from permanent sample plots located in these regions. The new models were derived for the following dependent variables: dbh (diameter at breast height) growth rate, survival rate, stem height and species group density index (SGDI) for large trees (7.5 cm and greater in dbh) and height and dbh growth rate for small trees (less than 7.5 cm in dbh). The mean residuals of the new FVS^{Ontario} models were smaller than the mean residuals of the original Lake States-TWIGS models, which indicated that the new models better represented the regional variation in site index, stand density and age for most species. Furthermore, an analysis of biological consistency indicated that all the dependent variables changed logically with changes in site index, stand density, basal area or age.

INTRODUCTION

Plusieurs projets de recherche ont été réalisés au cours des quarante dernières années en vue de développer des modèles de croissance des peuplements forestiers. Tous ces projets visaient à étudier et fournir des outils d'aide à la décision susceptibles de mieux prédire la croissance des peuplements et des arbres par rapport aux tables de rendement classiques qui sont encore utilisées. Parmi les divers modèles mis au point en Amérique du Nord, le modèle « Forest Vegetation Simulator » (FVS) continue de susciter un intérêt marqué de la part des organismes qui recherchent des méthodes de modélisation de croissance, grâce à sa flexibilité dans la modélisation des résultats de traitements sylvicoles pour une gamme étendue d'espèces et de types de forêts de l'ensemble des États-Unis, puis, plus récemment, de l'Ouest canadien.

Même s'il existe un éventail important de modèles et d'approches, on a consacré assez peu d'efforts à la validation et à la calibration de ces modèles, particulièrement au Canada. Ces deux étapes importantes sont cependant nécessaires, car elles permettent de garantir que les modèles fournissent des prédictions aussi précises que possible. Cette plus grande précision permet en retour aux aménagistes forestiers de mieux justifier les investissements requis pour les traitements sylvicoles. C'est ainsi qu'a été réalisée la validation de la variante Lake States du FVS pour les principaux types de forêts de l'Ontario (Lacerte et collab., 2004). Les résultats ont mis en lumière l'existence de problèmes notables dans les prévisions de la variante LS-TWIGS de FVS pour les conditions des forêts de l'Ontario. Les taux de mortalité prédits étaient particulièrement bien supérieurs aux taux observés, et les erreurs entre prédictions et observations pour la croissance en diamètre à hauteur de poitrine (dhp) ont été relativement importantes (Lacerte et collab., 2004). Devant ces résultats, on a donc entrepris un exercice de calibration afin d'adapter FVS aux conditions de la forêt ontarienne.

Les ensembles de données ayant servi à l'étalonnage de LS-TWIGS de FVS comprennent plusieurs espèces du centre de l'Ontario et de la région forestière boréale du Nord de l'Ontario : épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.), érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.), pin blanc (*Pinus strobus* L.), pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.), hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), tilleul d'Amérique (*Tilia americana* L.), ostryer de Virginie (*Ostrya virginiana* [Mill.] K. Koch), érable argenté (*Acer saccharinum* L.), peuplier baumier (*Populus balsamifera* L.), chêne rouge (*Quercus rubra* L.), cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.), caryer cordiforme (*Carya cordiformis* [Wangenh.] K. Koch) et frêne blanc (*Fraxinus americana* L.).

Les objectifs de la présente étude étaient de dériver de nouveaux modèles pour le taux de croissance en dhp, le taux de survie, la hauteur des tiges (en fonction du dhp) et l'indice de densité de groupe d'espèces (IDGE), et d'effectuer des analyses de cohérence biologique afin de vérifier si les modèles de prédiction des nouveaux modèles sont biologiquement cohérents pour différentes conditions de dimensions des tiges, d'indice de site, d'âge, de densité de peuplement, de dhp moyen ou de surface terrière.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La dérivation des nouveaux modèles pour FVS^{Ontario} a été entreprise pour plusieurs espèces : épinette noire, pin gris, sapin baumier, épinette blanche, peuplier faux-tremble, bouleau blanc, érable à sucre, pin blanc, pin rouge, hêtre à grandes feuilles, bouleau jaune, tilleul d'Amérique, ostryer de Virginie, érable argenté, peuplier baumier, chêne rouge, cerisier tardif, caryer cordiforme et frêne

blanc. Le contenu de la banque de données provenait de neuf sources différentes constituées principalement de placettes-échantillons permanentes comptant 308 660 arbres. Deux groupes d'ensembles de données ont été établis pour la présente étude : un pour la région forestière boréale et un autre pour la région des Grands Lacs–Saint-Laurent. L'ensemble de données de la région forestière boréale comprend des données sur des PEP issues de cinq sources de registres de croissance pour les peuplements de conifères et de feuillus du Nord de l'Ontario : AmCan (AC), Beckwith-Roebbelen (BR), Beckwith-Roebbelen Limestone (BRL) Lake, KimClark (KC) et Spruce Falls Power and Paper Co. (SFPP) (tableau 1). L'ensemble de données « Grands Lacs–Saint-Laurent » est constitué de données sur des PEP de mélanges d'espèces de conifères et de feuillus rencontrées fréquemment dans les forêts de la région Grands Lacs–Saint-Laurent du bouclier canadien. Les données sur la croissance sont tirées des sources suivantes de données sur des PEP : ACHRAY (AH), ARGS (AR), Beckwith hardwood (BE) et Red pine plantations (PR) (tableau 1). La majeure partie des renseignements pour les deux ensembles de données ont été récoltés dans des peuplements naturels purs et mixtes. Les données sur les plantations sont disponibles dans les ensembles de données BR, BRL et PR pour l'épinette noire, le pin gris, le pin rouge et l'épinette blanche. Plusieurs ensembles de données pour la région Grands Lacs–Saint-Laurent ont été tirés d'expériences sylvicoles effectuées dans les années 1950, 1960 et 1970. Pour la plupart des espèces, les données sont très diversifiées en âge, densité de peuplement et indice de site (tableau 1). La variation relativement grande pour l'indice de site reflète les niveaux de rendement pour des sites pauvres, moyens et riches. La variabilité dans la densité de peuplement selon les âges indique que la banque de données couvre différentes conditions de compétition et d'autoéclaircie à diverses phases de développement. Nous avons considéré qu'aucune activité d'aménagement visant à réduire la densité n'avait eu lieu.

Calcul des variables dépendantes et indépendantes

Quelques variables dépendantes et indépendantes ont été calculées aux échelles de l'arbre et du peuplement avant de commencer la dérivation des modèles. Ces variables comprennent : le taux de croissance en dhp, le taux de survie et, pour chaque arbre au sein d'un peuplement, la surface terrière de tous les arbres plus grands que l'arbre cible (STG).

On a d'abord établi deux sous-ensembles de données : un pour les modèles de grands arbres et un pour les modèles de petits arbres. Celui des modèles pour les grands arbres a été établi pour tous les arbres de 7,5 cm ou plus en dhp, tandis que ceux de moins de 7,5 cm en dhp ont été regroupés dans le sous-ensemble de modèles pour les petits arbres. La dérivation des modèles de taux de croissance en dhp et de taux de survie pour les grands et les petits arbres de chaque espèce nécessitait un nouveau mesurage des données de dhp à l'échelle de l'arbre. On a donc extrait tous les arbres identifiés avec un minimum de deux mesures dans les parcelles échantillons. Dans la plupart des cas, trois mesures ont été effectuées pour chaque arbre utilisé dans le sous-ensemble de données. À partir de deux mesurages successifs, le taux de croissance annuel en dhp observé à l'échelle de l'arbre est calculé comme suit :

$$\Delta dhp = \frac{dhp_2 - dhp_1}{T_2 - T_1}$$

où Δdhp est le taux de croissance annuel en dhp (cm an^{-1}) et dhp_2 et dhp_1 sont le dhp au temps T_2 et au temps T_1 , respectivement.

Tableau 1. Résumé des données utilisées pour la calibration de FVS^{Ontario}.

Espèces dominantes	Origine	% d'espèces dominantes par surface terrière	Âge (années)	Densité de peuplement (tiges ha ⁻¹)	Dhp quadratique moyen (cm)	Indice de site (IS) (m)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)	Hauteur dominante (m)	Volume total (m ³ ha ⁻¹)	Volume marchand (m ³ ha ⁻¹)	Origine de l'ensemble de données	Nombre de placettes-échantillons
Épinette noire	Naturelle	>70	98 (29-213)*	3826 (338-10378)	11,4 (4,2-20,9)	12 (6-19)	30,7 (3,6-48,6)	17,3 (7,7-27,7)	194 (22-357)	129 (0-305)	Rég. for. boréale	58
Épinette noire-autres conifères**	Naturelle	>50	97 (40-176)	3005 (675-7833)	13,9 (5,3-24,5)	14 (8-22)	36,7 (14,4-49,0)	19,9 (11,8-24,7)	266 (62-404)	195 (5-372)	Rég. for. boréale	17
Épinette noire-autres feuillus [£]	Naturelle	>50	87 (61-111)	2008 (667-3855)	16,0 (12,6-18,8)	15 (13-20)	38,4 (16,5-48,2)	20,9 (18,7-23,8)	283 (127-372)	188 (90-275)	Rég. for. boréale	8
Épinette noire	Plantation	>70	27 (9-46)	2972 (744-10975)	8,7 (1,5-15,5)	13 (6-25)	16,8 (0,4-42,0)	9,2 (2,1-17,2)	73 (1-216)	27 (0-156)	Rég. for. boréale	43
Épinette noire-autres conifères	Plantation	>50	28 (19-36)	7600 (6100-9050)	6,7 (3,8-9,6)	14 (10-15)	27,2 (10,2-44,1)	8,8 (4,7-11,9)	119 (30-236)	31 (0-65)	Rég. for. boréale	2
Pin gris	Naturelle	>70	74 (29-152)	2653 (633-6538)	13,7 (7,2-22,9)	16 (11-20)	32,9 (14,3-45,5)	19,2 (8,2-25,6)	263 (114-416)	201 (16-382)	Rég. for. boréale	44
Pin gris-autres conifères	Naturelle	>50	99 (35-135)	2468 (588-4613)	14,7 (10,2-22,8)	14 (12-21)	38,3 (17,8-44,2)	20,4 (17,1-23,1)	300 (115-374)	226 (78-322)	Rég. for. boréale	13
Pin gris-autres feuillus	Naturelle	>50	63 (36-114)	2377 (976-3904)	14,1 (9,6-20,1)	17 (15-19)	32,5 (28,5-37,5)	19,6 (14,8-23,8)	255 (180-340)	161 (72-267)	Rég. for. boréale	4
Épinette blanche	Naturelle	>70	21 (6-47)	3857 (500-8600)	6,5 (0,9-18,3)	6 (2-19)	15,8 (0,0-47,9)	8,2 (1,7-17,1)	66 (1-277)	24 (0-191)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	28
Épinette blanche - autres conifères	Naturelle	>50	19 (6-33)	4909 (625-8100)	5,0 (1,2-9,1)	8 (3-13)	13,4 (0,1-35,1)	10,3 (1,9-18,8)	61 (1-191)	24 (0-89)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	3
Épinette blanche-autres feuillus	Naturelle	>50	17 (11-33)	4953 (3600-6550)	5,0 (2,7-9,8)	9 (9-9)	10,7 (3,5-28,0)	9,9 (6,8-17,6)	52 (10-153)	14 (0-47)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	3

Espèces dominantes	Origine	% d'espèces dominantes par surface terrière	Âge (années)	Densité de peuplement (tiges ha ⁻¹)	Dhp quadratique moyen (cm)	Indice de site (IS) (m)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)	Hauteur dominante (m)	Volume total (m ³ ha ⁻¹)	Volume marchand (m ³ ha ⁻¹)	Origine de l'ensemble de données	Nombre de placettes-échantillons
Peuplier faux-tremble	Naturelle	>70	72 (30-214)	3127 (272-8735)	13,9 (4,7-26,9)	19 (6-24)	35,7 (5,0-50,3)	21,9 (12,6-29,3)	305 (63-500)	181 (0-431)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	39
Peuplier faux-tremble-autres conifères	Naturelle	>50	86 (28-193)	2500 (550-6822)	14,7 (5,8-25,0)	18 (14-22)	37,2 (4,1-50,4)	22,3 (13,8-27,6)	317 (109-502)	212 (0-467)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	18
Peuplier faux-tremble-autres feuillus	Naturelle	>50	46 (23-98)	4637 (700-7228)	10,4 (6,7-21,7)	20 (8-22)	31,6 (9,0-47,5)	18,5 (10,8-25,9)	215 (95-454)	63 (0-394)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	7
Bouleau blanc	Naturelle	>70	-	992 (992- 992)	8,6 (8,6- 8,6)	-	5,8 (5,8- 5,8)	-	-	-	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	1
Bouleau blanc –autres feuillus	Naturelle	>50	94 (81-114)	1524 (658-3632)	12,5 (8,8-19,0)	19 (18-19)	20,1 (6,6-38,8)	25,2 (23,7-28,1)	317 (312-325)	233 (211-254)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	5
Érable à sucre	Naturelle	>70	79 (27-120)	782 (42-3989)	22,8 (8,3-50,5)	20 (17-24)	21,7 (2,2-44,5)	22,5 (13,3-28,1)	236 (106-416)	103 (0-216)	Grands Lacs-Saint-Laurent	196
Érable à sucre -autres conifères	Naturelle	>50	-	659 (542-825)	17,9 (11,7-25,4)	-	19,2 (5,8-30,5)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	2
Érable à sucre –autres feuillus	Naturelle	>50	64 (32-120)	3117 (125-9075)	16,4 (5,9-36,9)	19 (15-20)	26,5 (6,6-36,6)	19,0 (14,5-24,2)	178 (97-274)	50 (0-182)	Grands Lacs-Saint-Laurent	36
Pin blanc	Naturelle	>70	102 (78-125)	940 (175-1950)	20,4 (11,8-43,5)	14 (10-17)	27,4 (7,5-42,6)	25,3 (16,4-32,7)	307 (123-486)	246 (44-449)	Grands Lacs-Saint-Laurent	42

Espèces dominantes	Origine	% d'espèces dominantes par surface terrière	Âge (années)	Densité de peuplement (tiges ha ⁻¹)	Dhp quadratique moyen (cm)	Indice de site (IS) (m)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)	Hauteur dominante (m)	Volume total (m ³ ha ⁻¹)	Volume marchand (m ³ ha ⁻¹)	Origine de l'ensemble de données	Nombre de placettes-échantillons
Pin blanc - autres conifères	Naturelle	>50	122 (115-125)	1216 (372-2950)	16,3 (10,1-31,8)	12 (12-13)	23,9 (6,4-46,3)	27,2 (26,2-28,6)	395 (327-416)	341 (293-372)	Grands Lacs-Saint-Laurent	14
Pin blanc – autres feuillus	Naturelle	>50	-	1402 (625-1850)	17,1 (15,1-23,9)	-	32,5 (20,7-47,0)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	4
Pin blanc	Plantation	>70	-	1615 (346-2593)	18,0 (14,1-32,1)	-	36,9 (19,7-48,9)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	9
Pin rouge	Naturelle	>70	-	1354 (450-2825)	18,0 (3,9-30,7)	-	32,4 (0,9-49,6)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	45
Pin rouge - autres conifères	Naturelle	>50	-	1254 (608-1842)	15,0 (8,8-22,3)	-	21,7 (8,4-33,9)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	6
Pin rouge	Plantation	>70	47 (23-74)	977 (318-2800)	24,1 (13,4-38,5)	22 (18-25)	39,1 (25,3-57,4)	19,7 (11,1-26,2)	338 (168-542)	310 (143-501)	Grands Lacs-Saint-Laurent	16
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	>70	-	1575 (1425-1700)	14,8 (14,3-15,4)	-	26,9 (26,5-27,2)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	1
Bouleau jaune	Naturelle	>70	-	670 (583-900)	16,4 (14,6-21,6)	-	15,3 (10,8-33,1)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	2
Bouleau jaune - feuillus	Naturelle	>50	-	497 (142-583)	18,5 (17,8-21,5)	-	12,6 (5,1-14,5)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	2
Chêne rouge	Naturelle	>70	75 (73-78)	236 (151-289)	28,5 (27,0-30,1)	22 (22-22)	14,7 (10,6-18,0)	26,5 (26,1-26,6)	141 (108-164)	91 (74-107)	Grands Lacs-Saint-Laurent	2
Chêne rouge - feuillus	Naturelle	>50	46 (39-54)	3227 (733-4350)	12,5 (10,8-14,3)	18 (18-18)	36,8 (9,1-47,3)	17,1 (16,0-18,4)	264 (223-312)	33 (5-78)	Grands Lacs-Saint-Laurent	2
Cerisier tardif	Naturelle	>70	-	600 (600- 600)	24,3 (24,3- 24,3)	-	27,9 (27,9- 27,9)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	1
Cerisier tardif – autres feuillus	Naturelle	>50	-	657 (650- 850)	23,7 (20,4- 23,9)	-	29,0 (27,9- 29,1)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	2

Espèces dominantes	Origine	% d'espèces dominantes par surface terrière	Âge (années)	Densité de peuplement (tiges ha ⁻¹)	Dhp quadratique moyen (cm)	Indice de site (IS) (m)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)	Hauteur dominante (m)	Volume total (m ³ ha ⁻¹)	Volume marchand (m ³ ha ⁻¹)	Origine de l'ensemble de données	Nombre de placettes-échantillons
Feuillus tolérants – autres feuillus [§]	Naturelle	>50	-	638 (625-650)	23,3 (21,9-24,8)	-	27,3 (24,5-30,3)	-	-	-	Grands Lacs-Saint-Laurent	2
Mélange de conifères [¶]	Naturelle	>50	95 (78-114)	1714 (658-2681)	13,9 (9,1-20,0)	15 (14-19)	27,7 (5,2-40,8)	21,8 (19,8-24,4)	299 (251-336)	208 (160-272)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	8
Mélange de feuillus [*]	Naturelle	>50	99 (89-112)	1287 (450-2375)	16,6 (12,4-20,8)	14 (14-15)	25,0 (12,6-32,9)	21,5 (19,9-23,2)	240 (236-244)	154 (144-169)	Rég. for. boréale et Grands Lacs-Saint-Laurent	7

*Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs minimales et maximales obtenues.

Légende :

**Plus de 30 % de la surface terrière compte d'autres conifères.

£Plus de 30 % de la surface terrière compte des espèces de feuillus.

§Plus de 50 % de la surface terrière compte des érables à sucre, des hêtres à grandes feuilles et des érables argentés; et plus de 30 % de la surface terrière compte des peupliers faux-tremble, des bouleaux blancs, des bouleaux jaunes, des tilleuls d'Amérique, des ostryers de Virginie, des érables argentés, des peupliers baumiers, des chênes rouges, des cerisiers tardifs, des caryers cordiformes et des frênes blancs.

¶Plus de 50 % de la surface terrière compte des épinettes noires, des pins gris, des sapins baumiers, des épinettes blanches, des pins blancs, des pins rouges et des mélèzes laricins.

*Plus de 50 % de la surface terrière compte des peupliers faux-trembles, des bouleaux blancs, des érables à sucre, des hêtres à grandes feuilles, des bouleaux jaunes, des tilleuls d'Amérique, des ostryers de Virginie, des érables argentés, des peupliers baumiers, des chênes rouges, des cerisiers tardifs, des caryers cordiformes et des frênes blancs.

Le taux de survie (TS) à l'échelle de l'arbre a été calculé à l'aide de l'équation proposée par Buchman (1983), Buchman (1985) et Buchman et collab. (1983) pour l'évaluation du taux de survie à l'échelle de l'arbre :

$$TS = \left[\sum_i X_i / \sum_i N_i \right]^{\left[\sum_i N_i / \sum_i i \cdot N_i \right]}$$

où TS est le taux de survie (entre 0 et 1), N_i et X_i sont le nombre d'arbres vivants au début et à la fin de l'intervalle d'observation de l'état, respectivement, et i est la longueur d'intervalle (en années).

Pour chaque arbre, la surface terrière de tous les arbres plus grands que l'arbre-cible a été calculée (STG [$\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$]), puisque cette variable a été utilisée comme variable indépendante dans les modèles de taux de survie et de taux de croissance en dhp et en hauteur des petits arbres. D'autres études faisant appel au calcul du taux de survie (par ex., Monserud et Sterba, 1999; Eid et Tuhus, 2001) montrent que la variable STG était une variable indépendante significative.

Dérivation de modèle(s)

Les différentes formules de modèles de base utilisées pour prédire plusieurs variables dépendantes comme fonction de variables d'arbre et de peuplement sont analogues à celles élaborées dans des versions précédentes du FVS (tableau 2). Toutes les formules de modèles énumérées au tableau 2 ont été analysées à l'aide de la procédure modèle de SAS (SAS Institute Inc., 2001) (voir l'exemple à l'annexe 1). Comme il y a eu des mesures répétées provenant de parcelles-échantillons permanentes, les tests Durbin-Watson et Godfrey ont été calculés. Si l'autocorrélation était significative, un modèle avec erreur autorégressive de second ordre était utilisé. Dans des cas particuliers, si une estimation de paramètre associé à une variable indépendante n'était pas statistiquement significative ($\alpha > 0,05$), la démarche suivante était adoptée : 1) la formule associée à la variable indépendante était modifiée, puis le programme était exécuté à nouveau, donnant lieu à un processus itératif; 2) si les essais successifs ne produisaient pas un modèle plus significatif, la variable indépendante associée au paramètre non significatif était exclue.

Tableau 2. Formules de modèles de base utilisées pour développer les modèles de prévision du taux de croissance en dhp, du taux de survie, de la hauteur des tiges et du IDGE (indice de densité de groupe d'espèces) pour FVS^{Ontario} comme fonction de différentes variables d'arbre et de peuplement.

Variables dépendantes	Modèles
Taux de croissance en dhp (cm année ⁻¹)	$\Delta dhp = \exp\left(\alpha_1 dhp^{\alpha_2} + \alpha_3 is^{\alpha_4} / \exp\left(\alpha_5 (dhp / dhp_moyen)^{\alpha_6} + \alpha_7 st^{\alpha_8}\right)\right) - 1 + \varepsilon$
Taux de survie (proportion)	$TS = \left(1 + \left(1 / \left(\exp\left(\alpha_1 dhp^2 + (\alpha_2 / stg) + \alpha_3 \Delta dhp^2\right)\right)\right)\right)^{-1} + \varepsilon$
Modèles hauteur-dhp (m)	$Ht = \left(1 - \exp(-\alpha_1 dhp)\right) st^{\alpha_2} + \varepsilon$
IDGE (arbres ha ⁻¹)	$IDGE = \alpha_1 (dhp_moyen \ prop)^2 + \alpha_2 st + \alpha_3 prop^2 + \varepsilon$
Modèle de croissance en hauteur des petits arbres (m année ⁻¹)	$\Delta Ht = \left(\exp\left(\alpha_1 \ln(ht)^2 + \alpha_2 ht \ stg + \alpha_3 \ln(stg)^2\right)\right) - 1 + \varepsilon$
Modèle de croissance en dhp des petits arbres (cm année ⁻¹)	$\Delta dhp = \alpha_1 \ln(dhp) + \alpha_2 stg^2 + \varepsilon$

Légende

dhp	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)
is	Indice de site (m)
dhp_moyen	dhp moyen d'un peuplement (cm)
st	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)
stg	Surface terrière des arbres plus grands que l'arbre sujet (m ² ha ⁻¹)
Δdhp	Taux de croissance du dhp (cm an ⁻¹)
ht	Hauteur des tiges -1,3 (m)
ΔHt	Taux de croissance en hauteur (m an ⁻¹)
prop	Pourcentage d'espèce basé sur le nombre de tiges par hectare (%)
α _n	Paramètres
ε	On considère que ε est ~ N (0, σ ² _ε)

Analyse de cohérence biologique

Lorsque le processus de dérivation de modèles statistiquement significatifs a été complété pour toutes les espèces et les variables, une analyse de cohérence biologique a été effectuée afin d'évaluer si les patrons de prédiction étaient logiques pour une grande amplitude de dhp sous différentes conditions d'indice de site, d'âge, de densité, de dhp moyen ou de surface terrière. Des valeurs extrêmes ont été utilisées en vue de tester la cohérence du modèle dans une large gamme de conditions. Par exemple, il fallait s'assurer que le taux de croissance en dhp augmentait avec une augmentation du dhp, mais qu'il diminuait avec une augmentation de la surface terrière. Lorsque l'effet d'une variable indépendante produisait un comportement biologique incohérent pour une espèce particulière et une variable dépendante, la formule du modèle était modifiée et testée de nouveau jusqu'à l'obtention d'un comportement biologique cohérent.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Description des nouveaux modèles

Taux de croissance en dhp

Tous les modèles élaborés pour le taux de croissance en dhp pour la suite des espèces étaient hautement significatifs (annexe 2). Pour près de la moitié des modèles, le dhp, le dhp moyen du peuplement et la surface terrière ont été des variables ayant contribué à une amélioration statistiquement significative du calage des modèles. Pour certaines espèces, les modèles n'ont eu que le dhp et le dhp moyen du peuplement ou le dhp et la surface terrière comme variables indépendantes. Ce fut le cas du sapin baumier, du bouleau blanc, du pin blanc en plantation, du bouleau jaune et du caryer cordiforme. L'estimation du paramètre pour l'indice de site n'a été significative que pour l'épinette noire en peuplements naturels, le pin gris et le peuplier baumier.

L'indice de site a été exclu pour l'épinette noire en plantation, le sapin baumier, l'épinette blanche en plantation, le peuplier faux-tremble et le bouleau blanc, car aucune formule de modèle ne produisait de paramètres significatifs pour cette variable indépendante. Même si l'indice de site était assez variable pour ces espèces, les données pour certaines valeurs d'indice de site étaient insuffisantes pour servir à la dérivation des modèles. Pour le pin rouge et le pin blanc en plantation, l'indice de site n'a pas été inclus à cause de sa faible variabilité pour les deux espèces. Au fur et à mesure que davantage de données de PEP seront disponibles pour une gamme plus étendue de qualités de sites, ces relations seront testées de nouveau et modifiées, le cas échéant.

Taux de survie

Pour le taux de survie, presque tous les modèles ont inclus le dhp, le taux de croissance en dhp et STG comme variables indépendantes avec des paramètres significatifs (annexe 2). Seul le bouleau blanc s'est distingué sur ce point, puisque seuls le dhp et le taux de croissance en dhp ont été significatifs. Tous les modèles élaborés ont été hautement significatifs ($\alpha < 0,05$).

Hauteur en fonction du dhp

La majorité des modèles hauteur-dhp ont inclus les mêmes variables indépendantes associées à des paramètres significatifs : le dhp et la surface terrière (annexe 2). Pour l'épinette noire, le bouleau blanc, le bouleau jaune et le chêne rouge, il n'y a pas eu de variable indépendante significative représentant l'effet de la densité de peuplement telle que la surface terrière. Pour l'épinette noire, le pin gris, le peuplier faux-tremble et le bouleau blanc, l'indice de site, qui était significatif a été inclus dans le modèle. Pour l'érable à sucre, le paramètre du diamètre quadratique moyen était significatif.

Indice de densité de groupe d'espèces

Le modèle de l'indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) a varié considérablement selon les espèces, mais tous les modèles ont inclus la surface terrière et le pourcentage d'espèces comme variables indépendantes statistiquement significatives (annexe 2).

Taux de croissance en hauteur et en dhp pour les petits arbres

Les modèles de croissance en hauteur pour les petits arbres ont été dérivés pour seulement quatre espèces, soient celles pour lesquelles suffisamment de données étaient disponibles (annexe 2). Les modèles ont varié selon les espèces, mais tous ont inclus au moins la hauteur et STG comme variables indépendantes. Le modèle de croissance en dhp pour les petits arbres a également été dérivé pour ces mêmes quatre espèces (annexe 2). Tous les modèles ont inclus le dhp et STG comme variables indépendantes.

Tous les modèles dérivés pour la série de modèles spécifiques aux espèces étaient hautement significatifs et représentaient mieux les conditions de croissance des forêts ontariennes pour la plupart d'entre elles. Ce point est confirmé par la comparaison des résidus moyens des nouveaux modèles dérivés et des résidus moyens obtenus avec les modèles originaux de FVS (tableau 3). Comme l'indique le tableau 3, les résidus moyens des nouveaux modèles étalonnés étaient inférieurs à ceux des modèles originaux de FVS, sauf dans le cas du modèle hauteur-dhp pour l'épinette noire en peuplements naturels et pour l'érable à sucre.

Tableau 3. Comparaison des résidus moyens des nouveaux modèles étalonnés et des résidus moyens calculés à l'aide des modèles originaux de FVS.

Modèle de taux de croissance en dhp

Espèces	Origine	Résidus moyens (cm an ⁻¹)	
		Nouveaux modèles étalonnés	Modèles originaux de FVS
Épinette noire	Naturelle	-0,0823	-0,1292
Épinette noire	Plantation	-0,1636	-0,2219
Pin gris	Naturelle	-0,0007	0,0021
Sapin baumier	Naturelle	0,0085	-0,1774
Épinette blanche	Plantation	-0,0620	-0,0686
Peuplier faux-tremble	Naturelle	-0,0779	-0,0942
Bouleau blanc	Naturelle	0,0043	-0,0669
Érable à sucre	Naturelle	-0,0384	-36,6786
Pin blanc	Naturelle	-0,0361	0,0434
Pin blanc	Plantation	-0,0031	-0,0354
Pin rouge	Plantation	-0,0038	-0,0272
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	-0,0568	-46,7013
Bouleau jaune	Naturelle	-0,0354	-32,6014
Tilleul d'Amérique	Naturelle	-0,1674	-0,1705
Érable argenté	Naturelle	-0,0173	-0,1096
Peuplier baumier	Naturelle	-0,0579	-0,2567
Chêne rouge	Naturelle	0,0302	-0,1148
Cerisier tardif	Naturelle	-0,0281	-0,8733
Caryer cordiforme	Naturelle	0,0212	-0,066

Modèle de taux de survie

Espèces	Origine	Résidus moyens (Proportion)	
		Nouveaux modèles étalonnés	Modèles originaux de FVS
Épinette noire	Naturelle	0,0000*	-0,0304
Pin gris	Naturelle	0,0000*	-0,0659
Sapin baumier	Naturelle	0,0000*	-0,0148
Épinette blanche	Plantation	-0,0081	-0,0544
Peuplier faux-tremble	Naturelle	-0,0001	-0,0552
Bouleau blanc	Naturelle	0,0000*	-0,0078
Érable à sucre	Naturelle	2,4800 ^E -05	-0,0194
Pin blanc	Naturelle	0,0001	-0,0122
Pin rouge	Naturelle	0,0000*	-0,0008
Pin rouge	Plantation	-0,0015	-0,0021
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	0,0000*	-0,0108
Peuplier baumier	Naturelle	0,0000*	-0,0692

Modèles hauteur-dhp

Espèces	Origine	Résidus moyens (m)	
		Nouveaux modèles étalonnés	Modèles originaux de FVS
Épinette noire	Naturelle	2,7162	1,7527
Pin gris	Naturelle	0,7497	-3,9704
Sapin baumier	Naturelle	-1,3895	-6,2414
Épinette blanche	Plantation	-1,4584	-1,5549
Peuplier faux-tremble	Naturelle	2,0681	-2,8942
Bouleau blanc	Naturelle	-0,4571	0,5579
Érable à sucre	Naturelle	-2,8431	-2,6737
Pin blanc	Naturelle	-1,8194	-5,0667
Pin rouge	Naturelle	0,1356	-5,5991
Pin rouge	Plantation	0,0303	-3,2268
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	-1,4553	-5,9650
Bouleau jaune	Naturelle	-0,6152	-1,5820
Tilleul d'Amérique	Naturelle	0,0669	-5,5175
Ostryer/Frêne			
blanc/Érable argenté	Naturelle	0,1052	-2,5920
Chêne rouge	Naturelle	-0,7535	-2,7963

IDGE

Espèces	Résidus moyens (arbres ha ⁻¹)	
	Nouveaux modèles étalonnés	Modèles originaux de FVS
Épinette noire	-148,3109	-275,6308
Pin gris	804,0518	-1153,7700
Épinette blanche	-20,5113	-521,8449
Tremble	720,6408	-1275,4000
Bouleau blanc	-15,7748	-45,6391
Pin blanc et rouge	175,1165	-2108,8000
Bois francs nordiques	-54,5861	-1278,6200
Chêne rouge	-32,7051	107,9950

Croissance en hauteur pour les petits arbres

Espèces	Résidus moyens (m an ⁻¹)	
	Nouveaux modèles étalonnés	Modèles originaux de FVS
Épinette noire	-0,0130	-0,0151
Sapin baumier	0,0143	-0,0637
Épinette blanche	0,0287	0,0935
Pin blanc	-0,0115	-0,3601

Croissance en dhp pour les petits arbres

Espèces	Résidus moyens (cm an ⁻¹)	
	Nouveaux modèles étalonnés	Modèles originaux de FVS
Épinette noire	-0,0256	3,9295
Sapin baumier	-0,0358	0,4078
Épinette blanche	0,0571	1,3997
Pin blanc	-0,0244	0,2916

* Une valeur inférieure à 10⁻⁶ a été inscrite comme égale à zéro.

Analyse de cohérence biologique

Modèles de taux de croissance en dhp

Le modèle du taux de croissance en dhp pour l'épinette noire en peuplements naturels a produit un patron de croissance cohérent (annexe 3.1, figures a, b et c). Pour de faibles indices de site, le taux de croissance en dhp a diminué avec une augmentation de la surface terrière, augmenté avec l'accroissement en dhp jusqu'à une valeur de seuil et resté relativement constant par la suite. Une tendance d'accroissement du taux de croissance en dhp avec une augmentation du dhp moyen a été observée. Pour des valeurs élevées de l'indice de site, le taux de croissance en dhp a augmenté avec le dhp jusqu'à une valeur de seuil, puis a diminué par la suite. Le modèle de changement pour ce qui est de la surface terrière et du dhp moyen a été semblable à celui des faibles valeurs d'indice de site. La diminution du taux de croissance en dhp avec une augmentation en dhp observée à quelques occasions semble incohérente et elle peut probablement s'expliquer par le fait que cette tendance est apparue dans des conditions d'indice de site et de surface terrière qui dépassaient la gamme de valeurs de l'ensemble des données de calibration. Le comportement biologique des

nouveaux modèles s'est montré beaucoup plus cohérent que celui du modèle original de FVS (annexe 3.1, figure d). Pour le modèle original de FVS, le modèle d'augmentation en dhp avec une diminution de la surface terrière n'a été cohérent que jusqu'à un dhp d'environ 40 cm. Ensuite, le taux de croissance en dhp a augmenté avec une augmentation de la surface terrière.

Pour l'épinette noire en plantation, le taux de croissance en dhp a augmenté avec un accroissement du dhp, mais a diminué avec une augmentation de la surface terrière et du dhp moyen (annexe 3.2, figures a, b et c). Le modèle original de FVS a affiché le même patron cohérent, mais les taux de croissance prédits ont été beaucoup plus faibles qu'avec le nouveau modèle et l'augmentation du taux de croissance en dhp avec une augmentation du dhp est devenue nulle à un dhp relativement peu élevé (annexe 3.2, figure d).

Pour le pin gris, le taux de croissance en dhp a augmenté avec une augmentation du dhp et de l'indice de site, mais diminué lorsque le dhp moyen a augmenté (annexe 3.3, figures a, b et c). Comparativement au nouveau modèle, le modèle original de FVS est beaucoup moins cohérent (annexe 3.3, figure d). La relation du taux de croissance en dhp en fonction du dhp a indiqué une légère diminution pour de petites valeurs de dhp, une augmentation jusqu'à une valeur de crête d'environ 20 cm, suivie d'une diminution marquée.

Pour le taux de croissance en dhp du sapin baumier, un modèle cohérent avec une augmentation du dhp et de la surface terrière a été obtenu, sauf pour de petits dhp avec les deux plus grandes valeurs de surface terrière (annexe 3.4, figure a). Le modèle original de FVS a indiqué une augmentation du taux de croissance en dhp jusqu'à une valeur de crête d'environ 20 cm pour les deux plus importantes valeurs de la surface terrière, suivie d'une diminution (annexe 3.4, figure b). L'épinette blanche en plantation a affiché un modèle cohérent (annexe 3.5, figures a, b et c). Alors que le taux de croissance en dhp a nettement augmenté avec le dhp aux valeurs les plus basses de dhp moyen, il a varié très peu avec une augmentation du dhp dans les deux plus importantes valeurs de dhp moyen du peuplement. Le modèle obtenu avec le nouveau modèle étalonné a différé totalement de celui que l'on a obtenu avec le modèle original de FVS (annexe 3.5, figure d). Cependant, le patron d'augmentation jusqu'à une valeur de crête de dhp suivie d'une diminution qui a été obtenu avec le modèle original de FVS est analogue au modèle observé pour d'autres espèces.

En général, le taux de croissance en dhp du peuplier faux-tremble a augmenté avec une augmentation du dhp, mais diminué avec une augmentation de la surface terrière et du dhp moyen (annexe 3.6, figures a, b et c). Les tendances observées à l'aide des modèles originaux de FVS n'étaient pas cohérentes : au début, augmentation rapide avec une augmentation du dhp, puis augmentation ou diminution plus ou moins régulière (annexe 3.6, figure d). Pour le bouleau blanc, le peu de données disponibles ne nous a pas permis d'effectuer une analyse de cohérence biologique exhaustive (annexe 3.7, figure a). Toutefois, le modèle obtenu a été beaucoup plus cohérent que celui qui a été obtenu avec le modèle original de FVS (annexe 3.7, figure d). Pour de faibles valeurs de dhp, le taux de croissance en dhp a diminué avec l'augmentation du dhp moyen. Cependant, cette tendance se renverse pour le dhp moyen le plus bas au-delà d'un dhp moyen du peuplement de 15 cm.

Les patrons de croissance obtenus avec le nouveau modèle calibré pour l'érable à sucre ont généralement été cohérents (annexe 3.8, figures a, b et c). La tendance générale de diminution dans le taux de croissance en dhp avec une augmentation du dhp moyen et de la surface terrière a été observée. Pour un dhp moyen de 5 cm, le modèle a été cohérent et le taux de croissance en dhp a augmenté avec une augmentation du dhp. Cependant, pour les deux valeurs les plus élevées du dhp moyen, une tendance de diminution du taux de croissance en dhp en fonction du dhp a été observée. Cette situation pourrait être attribuable aux âges relativement élevés des arbres et au manque de données pour les arbres à des valeurs élevées de dhp moyen et de surface terrière.

Comparativement aux nouveaux modèles, les patrons de croissance obtenus avec les modèles originaux de FVS étaient complètement différents (annexe 3.8, figure d).

Plusieurs espèces ont présenté le même patron général de croissance avec les nouveaux modèles calibrés : le pin blanc en peuplements naturels, le hêtre à grandes feuilles, le tilleul d'Amérique, l'érable argenté et le chêne rouge (annexes 3.9, 3.12, 3.14, 3.15 et 3.17, figures a, b et c). Le taux de croissance en dhp a toujours diminué avec une augmentation de la surface terrière. Pour un dhp moyen relativement peu élevé, le taux de croissance en dhp a augmenté avec l'accroissement du dhp. Lorsque le dhp moyen augmentait, il n'y a eu soit aucune tendance de changement dans le taux de croissance du dhp en fonction du dhp ou une très faible diminution. Pour chacune de ces espèces, les patrons de croissance obtenus avec les modèles originaux de FVS ont différé considérablement de ceux que l'on obtient avec les nouveaux modèles (annexes 3.9, 3.12, 3.14, 3.15 et 3.17, figure d).

On n'a disposé que de très peu de données pour le pin blanc en plantation (annexe 3.10, figure a). Pour les différentes conditions de dhp moyen illustrées, le taux de croissance en dhp a augmenté avec une augmentation du dhp et diminué avec le dhp moyen du peuplement. Le patron de croissance obtenu avec le modèle original de FVS était incohérent puisque le taux de croissance en dhp prédit a diminué avec une diminution du dhp moyen pour une amplitude importante de dhp (annexe 3.10, figure b). Pour le pin rouge en plantation, le taux de croissance en dhp a généralement diminué avec une augmentation de la surface terrière, du dhp moyen du peuplement et du dhp (annexe 3.11, figures a, b et c). Toutefois, pour les valeurs les plus basses de dhp moyen et de surface terrière, le taux de croissance en dhp a augmenté avec une augmentation du dhp (annexe 3.11, figure a). La diminution du taux de croissance du dhp avec une augmentation du dhp était incohérente. Cette tendance peut s'expliquer par la pénurie de données de calibration en ce qui concerne les valeurs élevées de surface terrière et de dhp moyen du peuplement. Comparativement aux nouveaux modèles calibrés, les modèles originaux de FVS ont généralement prédit des taux de croissance en dhp plus faibles avec une augmentation de la surface terrière (annexe 3.11, figure d). Pour le bouleau jaune, le modèle du taux de croissance en dhp avec une augmentation du dhp a montré une relation inverse : d'une tendance à l'augmentation pour les valeurs faibles de surface terrière, il est passé à une tendance à la diminution avec une augmentation de la surface terrière (annexe 3.13, figure a). La diminution du taux de croissance en dhp avec une augmentation du dhp est incohérente et peut s'expliquer par le fait que ces prédictions ont été faites en dehors de l'ensemble de données de calibration. Le patron de croissance obtenu avec le nouveau modèle calibré était plus cohérent biologiquement que le modèle obtenu avec le modèle original de FVS, qui prédisait des fluctuations pour une certaine gamme de valeurs de dhp (annexe 3.13, figure b).

Le peuplier baumier a affiché un patron de croissance différent comparativement à la plupart des autres espèces (annexe 3.16, figures a, b et c). Le taux de croissance en dhp augmentait avec l'accroissement du dhp jusqu'à une valeur de seuil, pour diminuer ensuite. Par rapport aux nouveaux modèles calibrés, les modèles obtenus à l'aide des modèles originaux de FVS étaient biologiquement incohérents, car il y a eu d'importantes fluctuations dans le taux de croissance en dhp prédit avec une augmentation du dhp (annexe 3.16, figure d). Pour le cerisier tardif, le taux de croissance dhp a diminué avec une augmentation du dhp moyen et la surface terrière, et augmenté avec l'accroissement en dhp (annexe 3.18, figures a, b et c). On note cependant une différence notable entre le taux de croissance en dhp prédit avec la plus faible valeur de surface terrière et les deux plus grandes valeurs. Le nouveau modèle a prédit des taux de croissance en dhp beaucoup plus faibles que le modèle original de FVS (annexe 3.18, figure d). Aussi, le modèle original du FVS affichait un patron de croissance incohérent pour le plus bas dhp moyen. Le taux de croissance en dhp pour le caryer a augmenté avec une augmentation du dhp et diminué avec une augmentation du dhp moyen du peuplement (annexe 3.19, figure a). Le taux de croissance en dhp prédit à l'aide du modèle

original de FVS était plus grand que celui obtenu avec le nouveau modèle, sauf pour le plus bas dhp moyen (annexe 3.19).

Modèles de taux de survie

Les modèles du taux de survie étaient cohérents pour toutes les espèces (annexe 4). Les taux de survie prédits ont généralement été supérieurs à 0,90. Même si les taux de survie prédits ont été très proches pour toutes les conditions du STG et du taux de croissance en dhp, toutes les espèces ont affiché un patron d'augmentation du taux de survie avec une augmentation du dhp et du taux de croissance en dhp, et diminution avec une augmentation du STG (annexe 4). Les prédictions du taux de survie obtenues avec les nouveaux modèles calibrés étaient plus élevées que celles obtenues à l'aide des modèles originaux de FVS. Ceci était particulièrement évident pour l'épinette noire en peuplements naturels, le pin gris, le sapin baumier, l'épinette blanche en plantation, l'érable à sucre, le pin blanc en peuplements naturels, le pin rouge en plantation et le peuplier baumier.

Modèles de la hauteur en fonction du dhp

Les modèles de prédiction de la hauteur en fonction du diamètre étaient cohérents pour toutes les espèces (annexe 5). La hauteur des arbres s'accroissait avec le dhp et l'augmentation de la surface terrière et de l'indice de site. Comparativement aux modèles originaux de FVS, le même patron de variation en ce qui concerne l'augmentation du dhp a été obtenu avec les nouveaux modèles étalonnés. Cependant, les amplitudes de variation en hauteur prédites par les nouveaux modèles pour différentes conditions de surface terrière étaient plus grandes pour la plupart des espèces que l'amplitude obtenue dans les modèles originaux de FVS (annexe 5).

Modèles de l'indice de densité de groupe d'espèces

Pour le IDGE, les groupes d'espèces d'épinette noire, du pin gris, du peuplier faux-tremble, du bouleau blanc, du pin rouge, du pin blanc, des bois francs nordiques et du chêne rouge étaient caractérisés par un patron d'augmentation des indices de densité relative avec une augmentation de la proportion d'espèces présentant un intérêt et de la surface terrière (annexe 6). Par ailleurs, le IDGE a généralement diminué avec une augmentation du diamètre moyen quadratique et du dhp moyen. Le groupe d'épinette blanche affichait généralement un patron d'augmentation du IDGE avec un accroissement de la proportion d'espèces présentant un intérêt (annexe 6.3). Cependant, pour certaines valeurs de surface terrière, l'augmentation du IDGE est suivie d'une baisse après l'atteinte d'une valeur de crête. Bien que l'on ait constaté un modèle d'augmentation du IDGE avec une augmentation de la surface terrière pour toutes les espèces, il y a eu une exception. Pour l'épinette blanche, le IDGE a diminué avec une augmentation de la surface terrière lorsque le dhp moyen maximum était respectivement de 30 et 28 cm. Cette tendance, qui n'est pas biologiquement cohérent, a probablement résulté de la faible quantité de données pour certaines conditions de surface terrière et de dhp moyen disponibles pour la dérivation du modèle pour cette espèce. Les modèles élaborés pour l'épinette blanche devront subir une nouvelle calibration après l'ajout de nouvelles données.

Modèles de croissance en hauteur des petits arbres

Les modèles de taux de croissance en hauteur pour les petits arbres étaient généralement biologiquement cohérents (annexe 7). Pour l'épinette noire et le sapin baumier – ainsi que l'épinette blanche et le pin blanc lorsque le STG était inférieur à $20 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ — le taux de croissance en hauteur augmentait avec l'accroissement de la hauteur et la diminution de STG (annexes 7.1 et 7.2). Cependant, pour ces espèces, il y a eu un écart important par rapport aux prédictions pour la plus petite classe de STG jusqu'à la classe suivante de STG en raison de changement graduel ou de

différences minimales pour les prédictions des niveaux suivants de STG. Cet écart important a différé de l'effet progressif de changement dans les variables indépendantes observé pour d'autres modèles au cours de la présente étude. L'effet de changement de STG a été plus régulier pour l'épinette blanche (annexe 7.3). Toutefois, la diminution du taux de croissance en hauteur au-delà d'une hauteur de seuil n'était pas biologiquement cohérente. Cela semble indiquer que pour ce qui est de l'épinette blanche, la limite de hauteur pour les petits arbres était probablement trop élevée. Par conséquent, le modèle pour grands arbres devrait sans doute s'appliquer pour une limite de 2,5 m de hauteur. Pour le pin blanc, le modèle obtenu était biologiquement cohérent pour seulement deux valeurs de STG (annexe 7.4). La tendance illustrée par l'annexe 7.4 semble indiquer que ce modèle devrait être appliqué jusqu'à une limite de STG de 25 m² / ha.

Modèles de croissance en dhp des petits arbres

Le modèle de croissance en dhp pour les petits arbres apparaissait biologiquement cohérent pour toutes les espèces sauf le pin blanc (annexe 8). Le taux de croissance en dhp a augmenté avec un accroissement du dhp, mais a diminué avec une augmentation du STG. Le fait que les prédictions pour le pin blanc se soient traduites par une diminution du taux de croissance en dhp avec une augmentation du dhp est sans doute attribuable au fait que très peu de données étaient disponibles pour la dérivation du modèle. Les modèles élaborés pour le pin blanc devront subir un nouvel étalonnage après ajout de nouvelles données.

Suggestions pour les orientations futures dans l'étalonnage du FVS^{Ontario}

Même si les nouveaux modèles dérivés de la présente étude ont généralement donné de meilleurs résultats que les modèles originaux de FVS, il faut poursuivre et même augmenter l'utilisation de la calibration. Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'ensemble des données employé pour certaines espèces n'a pas représenté avec assez d'exactitude la variation dans les caractéristiques de peuplement pour nous permettre de dériver un modèle qui serait censé couvrir toutes les conditions possibles d'indice de site, de densité de peuplement et d'âge généralement rencontrées dans les forêts ontariennes. Nos suggestions pour l'avenir portent sur quatre aspects :

Manque de données d'étalonnage

Le tableau ci-dessous énumère les espèces et les types de modèles pour lesquels il serait souhaitable d'avoir davantage de données.

Espèces/origine	Taux de croissance en dhp	Taux de survie	Modèles hauteur-dhp	Croissance en dhp et en hauteur des petits arbres
Épinette noire - naturelle				
Épinette noire – plantation		*		
Pin gris – naturelle				
Pin gris – plantation				
Sapin baumier				
Épinette blanche - naturelle				
Épinette blanche – plantation				
Peuplier faux-tremble				
Bouleau blanc				
Érable à sucre				

Espèces/origine	Taux de croissance en dhp	Taux de survie	Modèles hauteur-dhp	Croissance en dhp et en hauteur des petits arbres
Pin blanc – naturelle				
Pin blanc – plantation				
Pin rouge – naturelle				
Pin rouge – plantation				
Hêtre à grandes feuilles				
Bouleau jaune				
Tilleul d'Amérique				
Ostryer de Virginie				
Érable argenté				
Peuplier baumier				
Chêne rouge				
Cerisier tardif				
Caryer cordiforme				
Cèdre				
Mélèze laricin				
Frêne noir				
Frêne blanc				
Orme				
Érable de Pennsylvanie				

*Les cases grises indiquent une insuffisance de données pour ces espèces spécifiques.

Étalonnage des groupes d'espèces

Dans les cas où il y a insuffisance de données pour permettre d'élaborer la suite de modèles voulus, il est nécessaire de créer des groupes d'espèces analogues. Trois groupes ont été établis :

- i. Autres bois tendres
- ii. Feuillus commerciaux
- iii. Feuillus non commerciaux

Données supplémentaires souhaitables pour les espèces déjà calibrées

Même si des modèles ont été élaborés pour de nombreuses espèces, une couverture complète fait encore défaut pour la liste suivante d'espèces et de gammes d'indices de site, d'âge ou de densité de peuplement. Il serait souhaitable de recueillir des données supplémentaires afin que des modèles plus robustes puissent être dérivés pour les situations suivantes :

Ensemble de données pour la région forestière boréale :

- a) Épinette noire – en forêt naturelle :
 - i. Indice de site inférieur à 10 m et âge inférieur à 50 ans.
 - ii. Indice de site supérieur à 20 m et âge supérieur à 40 ans.
- b) Épinette noire — en plantation :
 - i. Indice de site supérieur à 20 m pour différentes tranches d'âges.
 - ii. Âge supérieur à 40 ans pour différents indices de sites.
- c) Pin gris – en forêt naturelle :
 - i. Indice de site inférieur à 10 m ou supérieur à 20 m pour différents âges.

- d) Peuplier faux-tremble :
 - i. Indice de site inférieur à 10 m et âge inférieur à 80 ans.
 - ii. Indice de site supérieur à 20 m et âge supérieur à 50 ans.
- e) Épinette blanche — en plantation :
 - i. Indice de site supérieur à 15 m pour différents âges.
 - ii. Âge supérieur à 40 ans pour différents indices de sites.

Ensemble de données pour la région Grands Lacs–Saint-Laurent :

- a) Cerisier tardif :
 - i. Toutes les conditions.
- b) Chêne rouge :
 - i. Toutes les conditions.
- c) Pin rouge — en plantation
 - i. Indice de site inférieur à 20 m pour différents âges.
 - ii. Âge supérieur à 60 ans pour différents indices de sites.
- d) Érable à sucre :
 - i. Indice de site inférieur à 15 m.
 - ii. Indice de site inférieur à 20 m et âge inférieur à 50 ans.
 - iii. Indice de site supérieur à 20 m et âge supérieur à 70 ans.
- e) Pin blanc – en forêt naturelle :
 - i. Indice de site inférieur à 10 m pour différents âges.
 - ii. Indice de site supérieur à 10 m et âge inférieur à 50 ans.
 - iii. Indice de site supérieur à 15 m pour différents âges.
- f) Bouleau jaune :
 - i. Indice de site inférieur à 15 m pour différents âges.
 - ii. Indice de site supérieur à 15 m et âge inférieur à 100 ans.

Recommandations pour la modélisation des résultats de traitements sylvicoles

À l'avenir, les activités de cueillette de données et de modélisation devraient se concentrer sur les résultats de traitements sylvicoles à l'échelle de l'arbre et du peuplement. Des données seront nécessaires pour différentes conditions de densité et pour les effets des traitements d'éclaircies de différents niveaux pour des peuplements ayant été mesurés à nouveau au moins deux fois. Bien qu'il vaille mieux utiliser des données provenant de situations mesurées plus d'une fois, on pourrait recourir à des approches à court terme faisant appel à l'analyse des tiges ou au carottage

CONCLUSION

Ce travail de calibration a abouti à une version du FVS^{Ontario} qui peut être testée en pratique en dépit de ses défauts. Des améliorations pourront être apportées aux paramètres et aux formules des modèles au fur et à mesure que l'Ontario accroît son réseau de parcelles et ses activités de mesures répétées des parcelles-échantillons permanentes. La présente version du modèle intègre encore les formules et les paramètres de Lake States-TWIGS pour une foule d'espèces non encore couvertes dans les ensembles de données dont dispose l'Ontario. Cette pénurie de données a une incidence sur la suite complète de modèles de FVS (grands arbres, petits arbres), mais elle devrait être corrigée avec le temps. Dans un avenir proche, une solution provisoire à court terme afin de réduire la dépendance aux modèles Lake States-TWIGS pour les espèces pour lesquelles nous manquons de données pourrait consister à développer des groupes d'espèces étendus tels que « conifères héliophiles des hautes terres » (fondé sur la tolérance et le site).

Même si le travail de recherche effectué pour élaborer ce modèle a été couronné de succès, il doit se poursuivre afin d'améliorer notablement la capacité prédictive des modèles, particulièrement pour des conditions ambiantes changeantes comme l'effet des changements climatiques. FVS^{Ontario} devrait pouvoir constituer un « moteur de croissance » pour de futurs modèles avec lesquels on ferait virtuellement « pousser » des arbres et des peuplements selon une foule de différents facteurs possibles (réchauffement de la planète, infestations d'insectes, maladies, incendies de forêt, etc.).

REMERCIEMENTS

Nos plus sincères remerciements au fonds du Patrimoine vital de l'Ontario, au ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, à Tembec Forest Research Partnership Inc. et au Centre écologique du Canada pour avoir soutenu financièrement ce projet. La présente étude a également bénéficié de l'appui du Réseau de recherche sur les processus des écosystèmes du Service canadien des forêts. Nous remercions Susan Stevens Hummel, de l'USDA Forest Service à la Pacific Northwest Station de Portland (Oregon), et Ronald E. McRoberts, de l'USDA Forest Service à la North Central Research Station de St. Paul (Minn.), pour leurs commentaires sur une version préliminaire de ce texte. Nous avons grandement apprécié le travail de révision du manuscrit effectué par Pamela Cheers et Benoit Arsenault, réviseurs au Centre de foresterie des Laurentides.

RÉFÉRENCES

- Buchman, R.G. 1983. Survival predictions for major Lake States tree species. USDA For. Serv., North Central For. Exp. Stn., Res. Paper NC-233. 7p.
- Buchman, R.G. 1985. Performance of a tree survival model on national forests. North. J. Appl. For. 2:114-116.
- Buchman, R.G.; Pederson, S.P.; Walters, N.R. 1983. A tree survival model with application to species of the Great Lakes region. Can. J. For. Res. 13:601-608.
- Eid, T.; Tuhus, E. 2001. Models for individual tree mortality in Norway. For. Ecol. Manag. 154:69-84.
- Lacerte, V.; Larocque, G.R.; Woods, M.; Parton, W.J.; Penner, M. 2004. Testing the Lake States variant of FVS (Forest Vegetation Simulator) for the main forest types of northern Ontario. For. Chron. 80:495-506.
- Monserud, R.A.; Sterba, H. 1999. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. For. Ecol. Manag. 113:109-123.
- SAS Institute Inc. 2001. Commercial Computer Software (release 8.02). SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Annexe 1. Exemple de programme SAS utilisé pour dériver les différents modèles.

```
/*proc model
dw=test durbin-watson*/
proc model data=blackSpruce_b;
  TITLE1 "BLACK SPRUCE_N";
  parms A2=-1.5719 A3=-0.0857 A44=0.1708 D2=0.261 C3=0.0202;
    tauxcrois_dhp=(EXP(((a2*(CurrDiam)**a3)+(SI**a44))/
      exp(((d2*CurrDiam/dhp_moy))+
        (c3*(ba)) )))-1;
  fit tauxcrois_dhp START=(A2=-1.5719 A3=-0.0857 A44=0.1708 D2=0.261 C3=0.0202)/CORRS
DW DWPROB OUT=PRED_TAUXCROIS_DBH OUTPREDICT GODFREY
  METHOD=GAUSS CONVERGE=0.000001 MAXITER=10000 WHITE PRL=WALD
OUTEST=AUTO.TAUXDBH_BSPRUCEN;
  %ar(tauxcrois_dhp,2);
run;
quit;
```

Annexe 2. Liste des nouveaux modèles calibrés pour FVS^{Ontario}.

Espèces	Origine	Modèle	$\sqrt{\text{MSE}}$
Modèles pour les grands arbres			
<u>Taux de croissance en dhp*</u>			
Épinette noire	Naturelle	$(\exp(-1,3894\text{dhp}^{-0,0538} + \text{is}^{0,1535} / \exp(0,1273(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,0219\text{st}))) - 1$	0,0788
Épinette noire	Plantation	$(\exp(0,6533\text{dhp}^{-0,7031} / \exp(-1,0769(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,00431\text{st}^{1,6318}))) - 1$	0,0856
Pin gris	Naturelle	$(\exp((2,2952\text{dhp_moyen}^{-1,4313} + 0,000064\text{is}^2) / (\exp(-0,039\text{dhp})))) - 1$	0,0862
Sapin baumier	Naturelle	$(\exp(0,0578\text{st} + 0,2131\text{dhp}/\exp(\text{dhp st})^{0,1886})) - 1$	0,1256
Épinette blanche	Plantation	$(\exp((\text{dhp}^{0,2628}) / (\exp((-0,1522(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})) + ((\text{st dhp})^{0,1490})))) - 1$	0,1366
Peuplier faux-tremble	Naturelle	$(\exp((\text{dhp st})^{-0,3447} / \exp(-0,3333(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})))) - 1$	0,1127
Bouleau blanc	Naturelle	$(\exp(\text{dhp}^{-1,2617} + 0,000072\text{dhp_moyen dhp}/\exp(-0,6411(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})))) - 1$	0,1125
Érable à sucre	Naturelle	$(\exp((\text{dhp st})^{-0,1885} / \exp(-0,0657(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,0137\text{st}))) - 1$	0,2143
Pin blanc	Naturelle	$(\exp((\text{dhp st})^{-0,2537} / \exp(-0,2010(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,0072\text{st}))) - 1$	0,1304
Pin blanc	Plantation	$(\exp(0,00356\text{dhp_moyen}/\exp(-1,1527(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})))) - 1$	0,3755
Pin rouge	Plantation	$(\exp(-0,00863\text{dhp} + 1,9255\text{st}^{0,4378} / \exp(-0,1322(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})))) - 1$	0,1664
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	$(\exp(\text{dhp}^{-0,2821} / \exp(-0,1282(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,0284\text{st}))) - 1$	0,2094
Bouleau jaune	Naturelle	$(\exp(-0,00003\text{dhp}^2 + 0,1136\text{dhp_moyen}^{0,1915} / \exp(-0,3248(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})))) - 1$	0,2018
Tilleul d'Amérique	Naturelle	$(\exp((\text{dhp st})^{-0,0234} / \exp(-0,1686(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,0555\text{st}))) - 1$	0,1758
Érable argenté	Naturelle	$(\exp(\text{st dhp}^{-0,2875} / \exp(-0,4235(\text{dhp}/\text{dhp_moyen})))) - 1$	0,1522
Peuplier baumier	Naturelle	$(\exp(-4,3221\text{dhp}^{-0,4410} + \text{is}^{0,2004} / \exp(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}))) - 1$	0,1202
Chêne rouge	Naturelle	$(\exp(\text{dhp}^{-0,5068} / \exp(-0,2577(\text{dhp}/\text{dhp_moyen}) + 0,000297\text{st}^2))) - 1$	0,1648
Cerisier tardif	Naturelle	$(\exp(0,0109\text{dhp}/\exp(0,0429\text{dhp_moyen st}))) - 1$	0,1621
Caryer cordiforme	Naturelle	$(\exp(0,021\text{dhp dhp_moyen}/\exp(0,2949\text{dhp_moyen}))) - 1$	0,1085

Taux de survie

Épinette noire	Naturelle	$(1+(1/(\exp(-0,00051dhp^2+183,0/stg+26,3716\text{taux croissance dhp_dhp}))))^{-1}$	0,0062
Pin gris	Naturelle	$(1+(1/(\exp(-0,00069dhp^2+135,3/stg+8,3767\text{taux_croissance_dhp_dhp}))))^{-1}$	0,0073
Sapin baumier	Naturelle	$(1+(1/(\exp(0,8038dhp+-0,0315stg+677,8\text{taux_croissance_dhp}))))^{-1}$	9,02E-9
Épinette blanche	Plantation	$(1+(1/(\exp(0,2273dhp+-0,2412stg+496,7\text{taux_croissance_dhp}))))^{-1}$	0,0117
Peuplier faux-tremble	Naturelle	$(1+(1/(\exp(0,00952dhp^2+119,7/stg+285,6\text{taux_croissance_dhp}^2))))^{-1}$	0,004
Bouleau blanc	Naturelle	$(1+(1/(\exp(0,0142dhp^2+662,9\text{taux_croissance_dhp}))))^{-1}$	1,11E-8
Érable à sucre	Naturelle	$(1+(1/(\exp(9,8728dhp+65,5455/stg+26,7809\text{taux_croissance_dhp}))))^{-1}$	2,65E-8
Pin blanc	Naturelle	$(1+(1/(\exp(176,9/bal+1,0844\text{taux_croissance_dhp_dhp}))))^{-1}$	0,0091
Pin rouge	Naturelle	$(1+(1/(\exp(0,0639dhp^2+605,3/stg+51,2761\text{taux_croissance_dhp}^2))))^{-1}$	2,65E-8
Pin rouge	Plantation	$(1+(1/(\exp(0,0168dhp^2+77,1451/stg+123,0\text{taux_croissance_dhp}^2))))^{-1}$	0,0076
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	$(1+(1/(\exp(0,00609dhp\ stg+430,2/stg+1,5572\text{taux_croissance_dhp bal}))))^{-1}$	0,0076
Peuplier baumier	Naturelle	$(1+(1/(\exp(4,6209dhp+-0,0841stg+393,7\text{taux_croissance_dhp}^2))))^{-1}$	3,59E-8

Modèle hauteur-dhp

Épinette noire	Naturelle	$32,3853((1-\exp(-0,0200dhp))^{1,0299})\ is^{0,2006}$	1,4124
Pin gris	Naturelle	$6,0237((1-\exp(-0,0601dhp))^{0,6449})\ is^{0,941}\ st^{0,0719}$	1,281
Sapin baumier	Naturelle	$(1-\exp(-0,035dhp))\ (dhp\ st)^{0,4373}$	2,2539
Épinette blanche	Plantation	$(27,7353st^{0,0931})\ ((1-\exp(-0,0310dhp))^{1,5241})$	1,4580
Peuplier faux-tremble	Naturelle	$(1-\exp(-0,1583dhp))\ st^{0,3929}\ (is\ dhp)^{0,2676}$	1,8190
Bouleau blanc	Naturelle	$10,1815(1-\exp(-0,0677dhp))\ is^{0,2824}$	1,5874
Érable à sucre	Naturelle	$(0,8924Dq)\ ((1-\exp(-0,0689dhp))^{1,2318})$	2,4770
Pin blanc	Naturelle	$(26,2624st^{0,1295})\ ((1-\exp(-0,0168dhp))^{0,7809})$	2,1377
Pin rouge	Naturelle	$(10,4580st^{0,3511})\ ((1-\exp(-0,0395dhp))^{1,1475})$	2,1239
Pin rouge	Plantation	$(0,6980st)\ ((1-\exp(-0,0619dhp))^{1,8594})$	2,0710
Hêtre à grandes feuilles	Naturelle	$(0,8867st)\ ((1-\exp(-0,0647dhp))^{1,0707})$	3,2160
Bouleau jaune	Naturelle	$19,8091((1-\exp(-0,00153dhp^2))^{0,3354})$	2,7436
Tilleul d'amérique	Naturelle	$(1-\exp(-0,2011dhp))\ (dhp\ st)^{0,4314}$	1,7571
Ostryer/frêne			
blanc/érable argenté	Naturelle	$(st^{0,9439})\ ((1-\exp(-0,0401dhp))^{0,7052})$	2,3657
Chêne rouge	Naturelle	$24,8731((1-\exp(-0,0533dhp))^{1,1757})$	1,9667

Indice de densité de groupe d'espèces^s

<u>Groupes d'espèces</u>			
Épinette noire		$(0,0693\text{prop st}^2)/(\exp(0,00337\text{st dhp_moyen}))$	127,0
Pin gris		$-0,0074\text{prop}^2\text{Dq}+8,5315\text{st}+13,1703\text{prop}+0,1126\text{prop}^2$	156,5
Épinette blanche		$((\text{st}^2\text{prop}^2)^{0,4785})+(-4,83\text{E}-6\text{dhp_moyen prop}^2\text{st}^2)$	228,6
Aspen		$-0,0119\text{dhp_moyen prop}^2+7,0235\text{st}+0,2940\text{prop}^2$	183,0
Bouleau blanc		$0,1929\text{prop st}+62,982\text{Dq}+14,8358\text{prop}$	174,8
Pin blanc et pin rouge		$-0,00695\text{prop}^2\text{dhp_moyen}+0,000046\text{st}^2\text{prop}^2+19,511\text{prop}$	247,5
Bois francs nordiques		$-0,00091\text{dhp_moyen prop}^2+0,00114\text{st prop}^2+4,4842\text{prop}$	109,2
Chêne rouge		$-0,0103\text{dhp_moyen prop}^2+1,3357\text{st}+0,3092\text{prop}^2$	22,5044

Modèles pour les petits arbres

Taux de croissance en hauteur

Épinette noire	Naturelle	$-0,6337+((\log(\text{stg})\text{ht})^{-0,0617})$	0,1095
Sapin baumier	Naturelle	$(\exp(0,0108\text{ht log}(\text{stg})+\log(\text{stg})^{-2,6830}))-1$	0,0893
Épinette blanche	Plantation	$0,2351+0,1435\text{ht}+0,0241\text{ht}^2+0,0192\text{stg}$	0,1079
Pin blanc	Naturelle	$(\exp(0,0704\log(\text{ht})^2+0,00233\text{ht stg}+0,0180\log(\text{stg})^2))-1$	0,0903

Taux de croissance en dhp

Épinette noire	Naturelle	$0,6944+0,0838\text{dhp}+0,00942\text{dhp}^2+0,2548\log(\text{stg})$	0,1253
Sapin baumier	Naturelle	$0,1683\log(\text{dhp})+0,0001\text{stg}^2$	0,1080
Épinette blanche	Plantation	$0,7164+0,0165\text{dhp}+0,2132\log(\text{stg})$	0,1453
Pin blanc	Naturelle	$\text{dhp}^{-3,0397}+\text{stg}^{-0,8391}$	0,0779

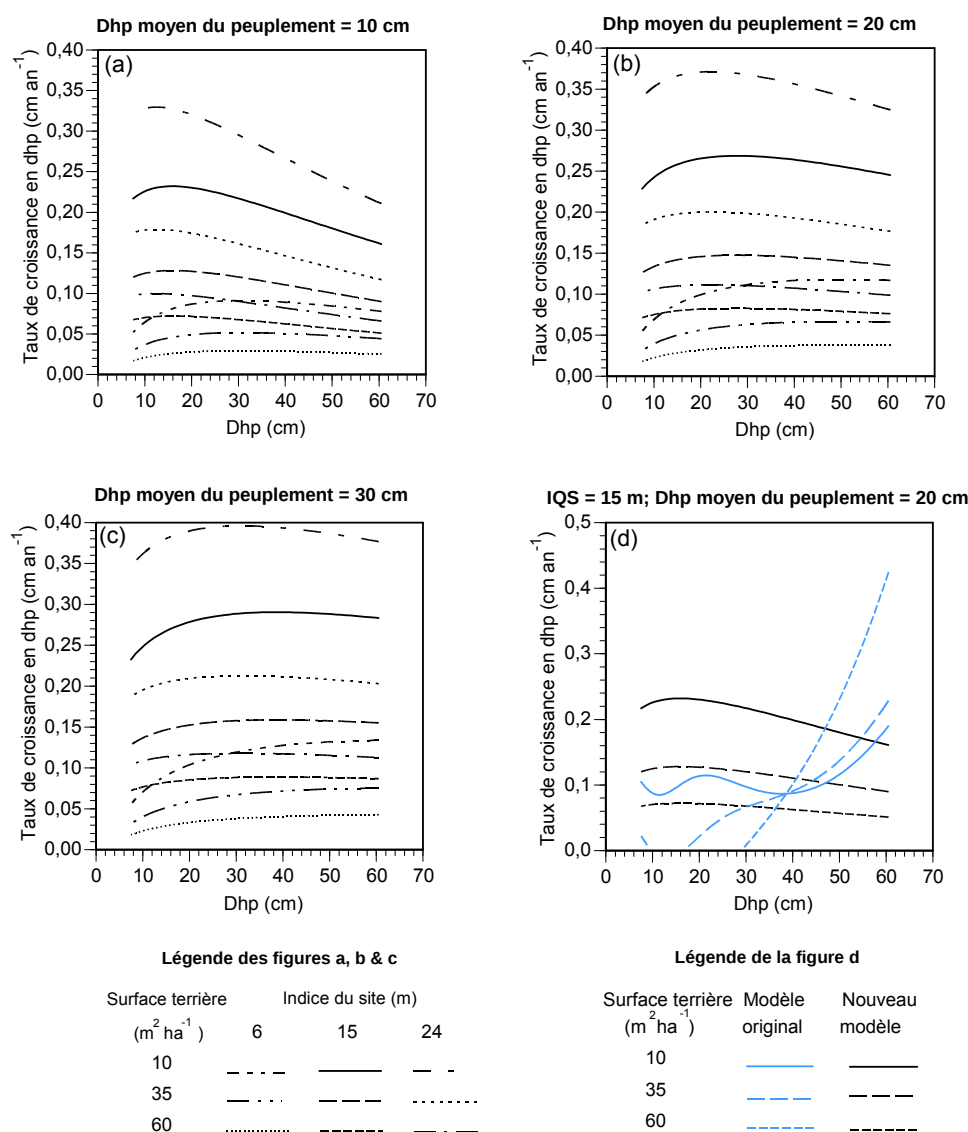
***Légende**

dhp	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)
is	Indice de site (m)
dhp_moyen	dhp moyen du peuplement (cm)
st	Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)
stg	Surface terrière des arbres plus grands que l'arbre cible ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)
taux_croissance_dhp	Taux de progression annuelle du dhp (cm année^{-1})
ht	hauteur de tige -1,3 (m)
Dq	Diamètre quadratique moyen à hauteur de poitrine (cm)
prop	Proportion d'espèces basée sur le nombre d'arbres par ha (%)
âge	Âge (année)

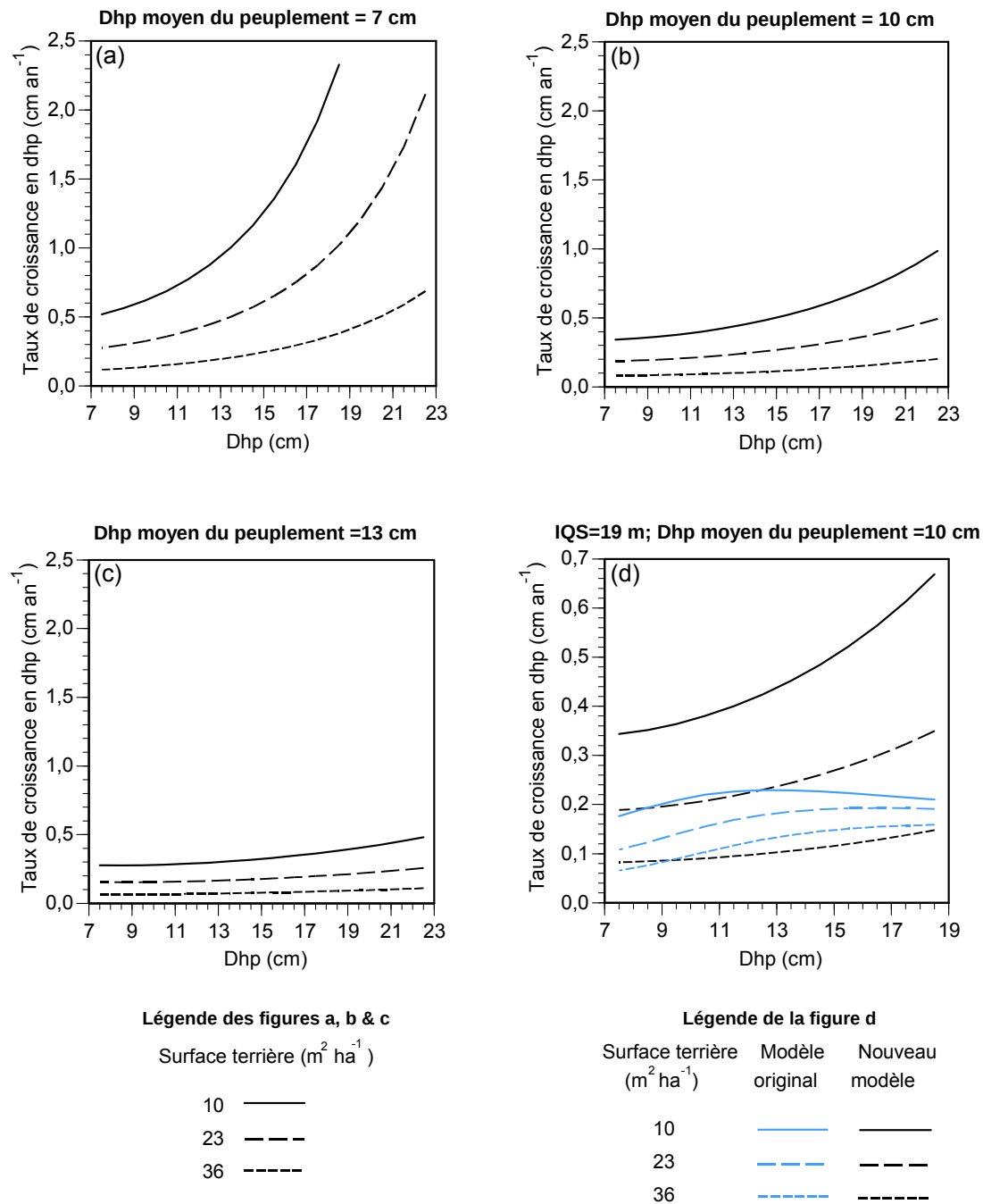
§Densité de peuplement (nombre d'arbres / ha) pour les espèces incluses dans chacun des groupes d'espèces suivants.

<u>Groupes d'espèces</u>	<u>Espèces</u>
Épinette noire	Épinette noire, sapin baumier et mélèze laricin
Pin gris	Pin gris
Épinette blanche	Épinette blanche, thuya occidental et tous cèdres
Aspen	Peuplier faux-tremble, peuplier baumier, érable de Pennsylvanie
Bouleau blanc	Bouleau blanc
Pin blanc et pin rouge	Pin rouge, pin blanc
Bois francs nordiques	Frêne noir, érable argenté, cerisier tardif, tous ormes, bouleau jaune, tilleul d'Amérique, érable à sucre, hêtre à grandes feuilles, frêne blanc et caryer cordiforme
Chêne rouge	Chêne rouge et ostryer de Virginie

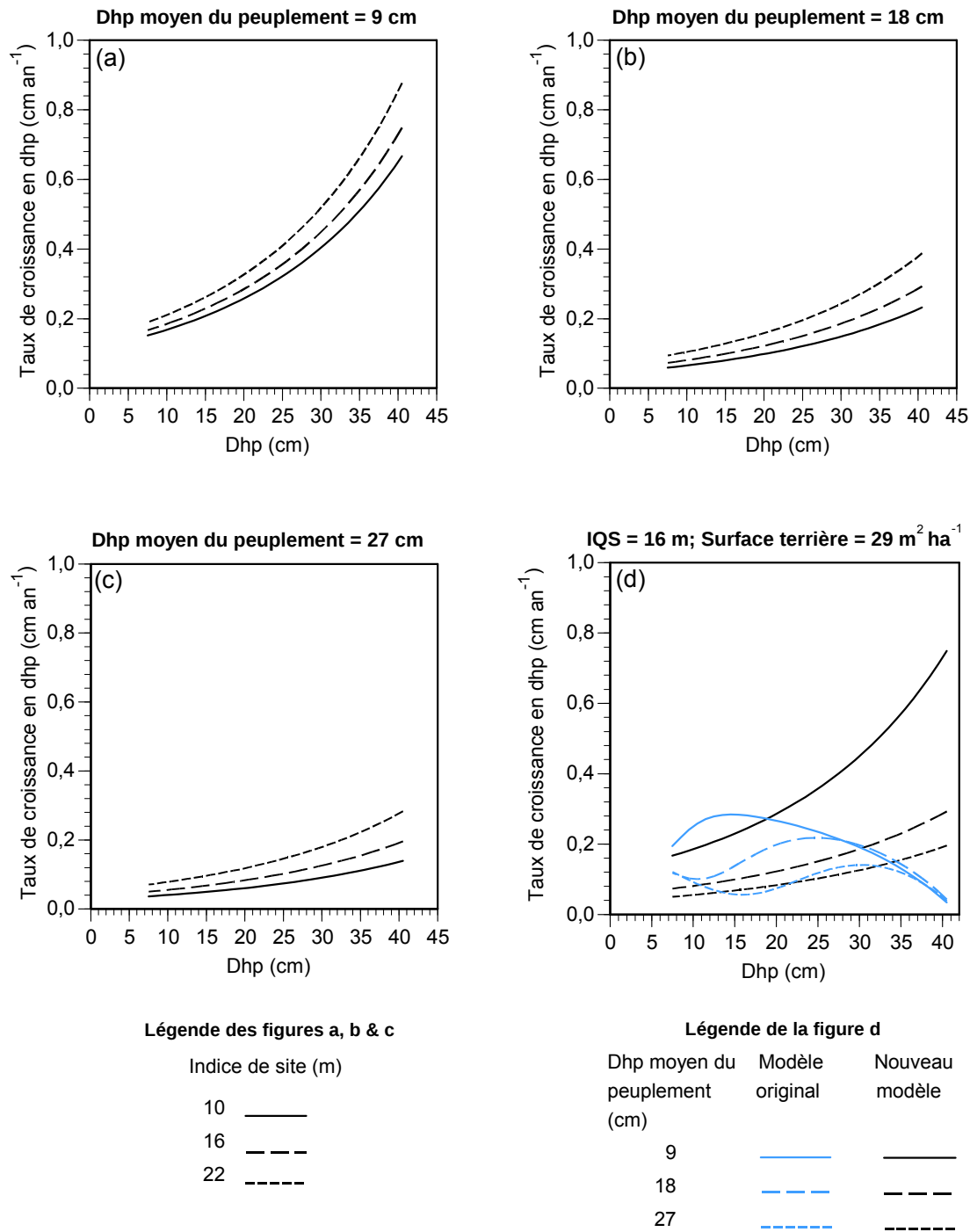
Annexe 3. Analyse de cohérence biologique pour les modèles de taux de croissance en dhp



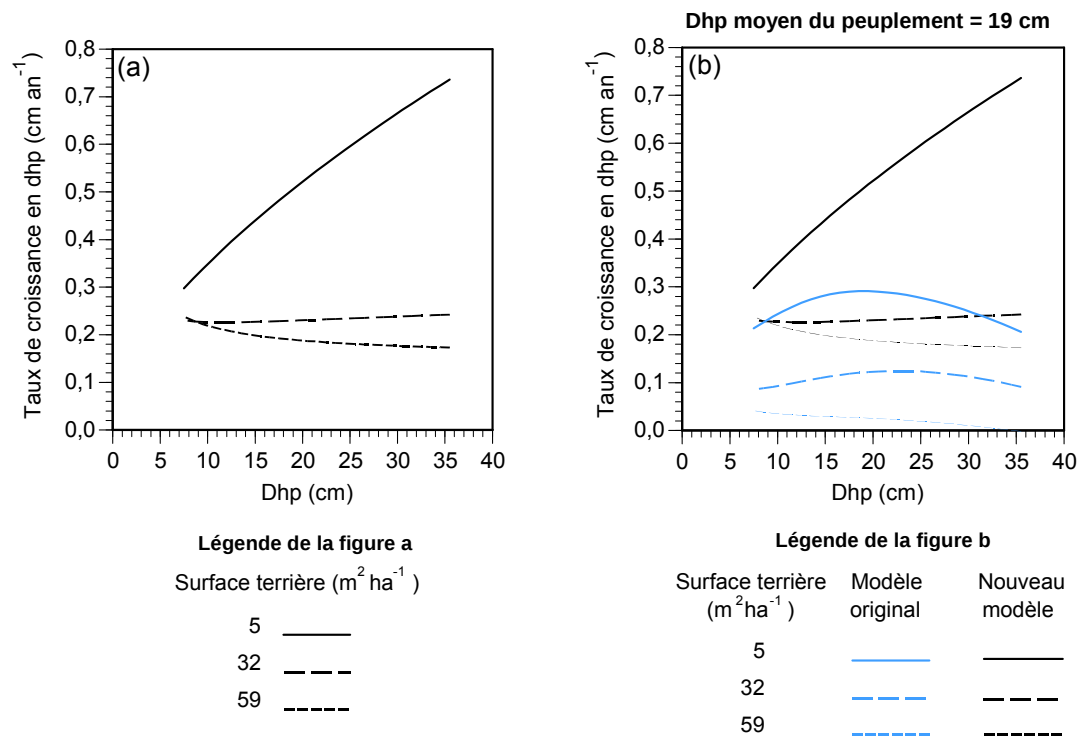
Annexe 3.1 : Taux de croissance en dhp prédit pour l'épinette noire en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière, d'indice de site et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



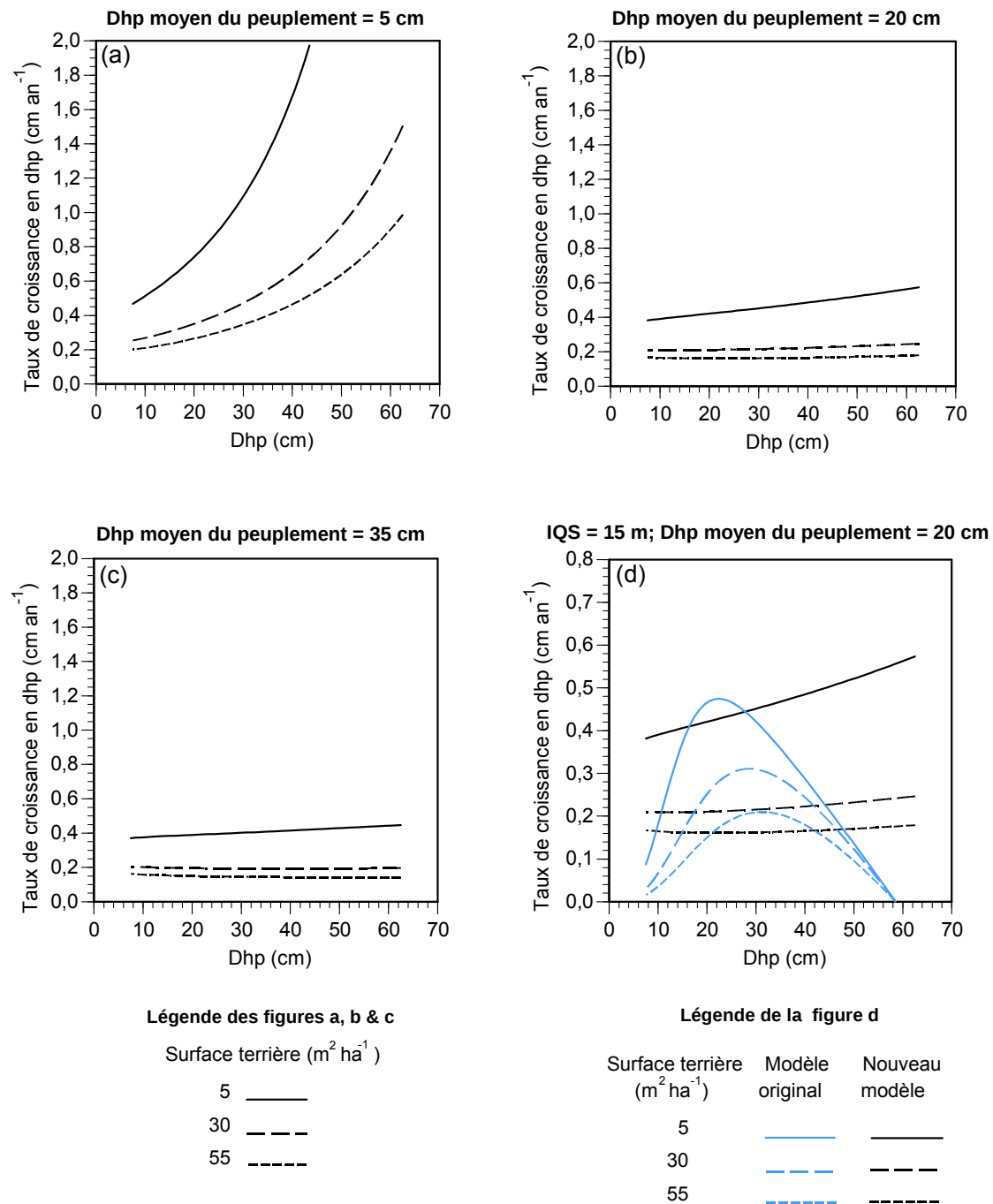
Annexe 3.2 : Taux de croissance en dhp prédit pour l'épinette noire plantée en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



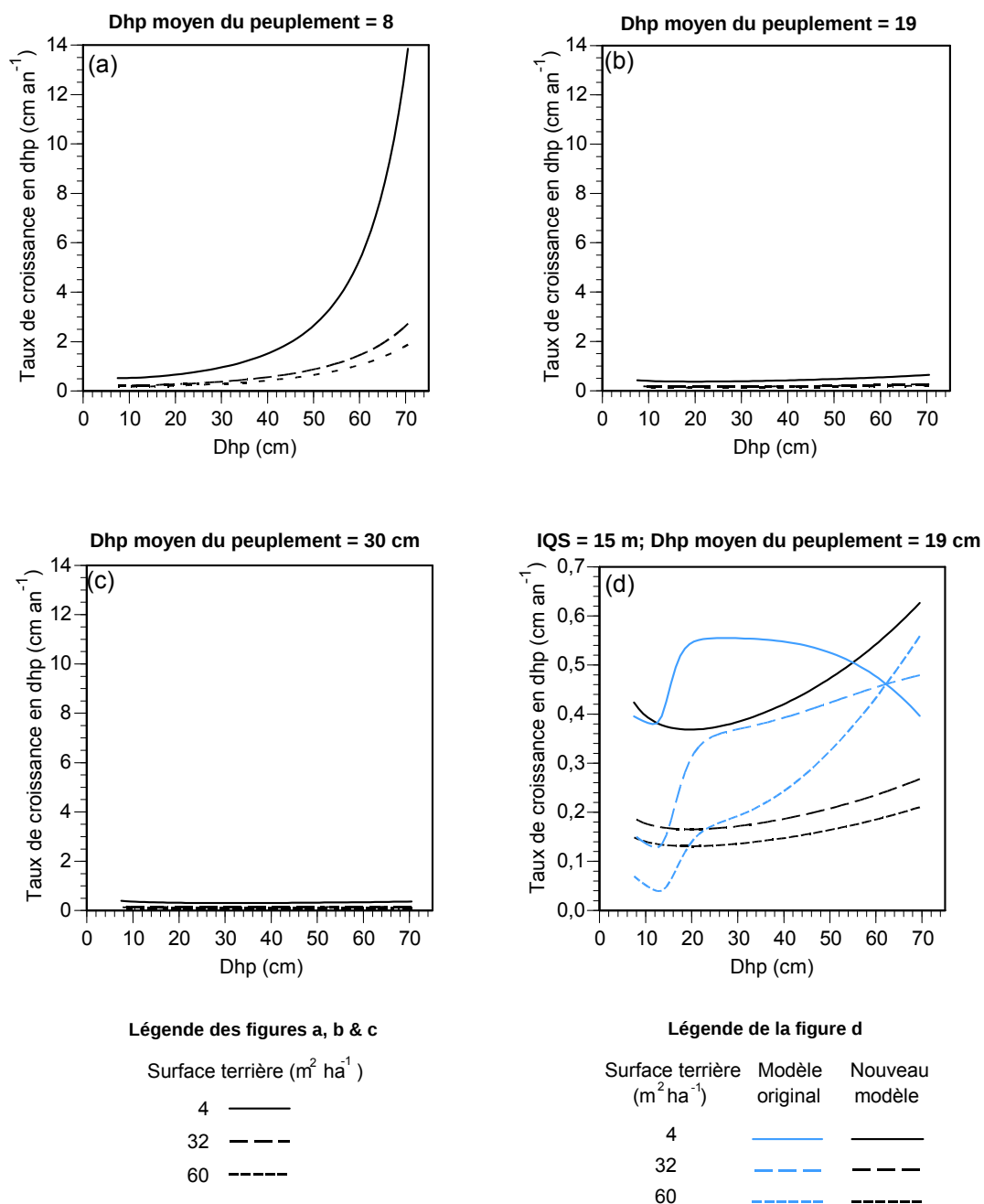
Annexe 3.3 : Taux de croissance en dhp prédit pour le pin gris en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions d'indice de site et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



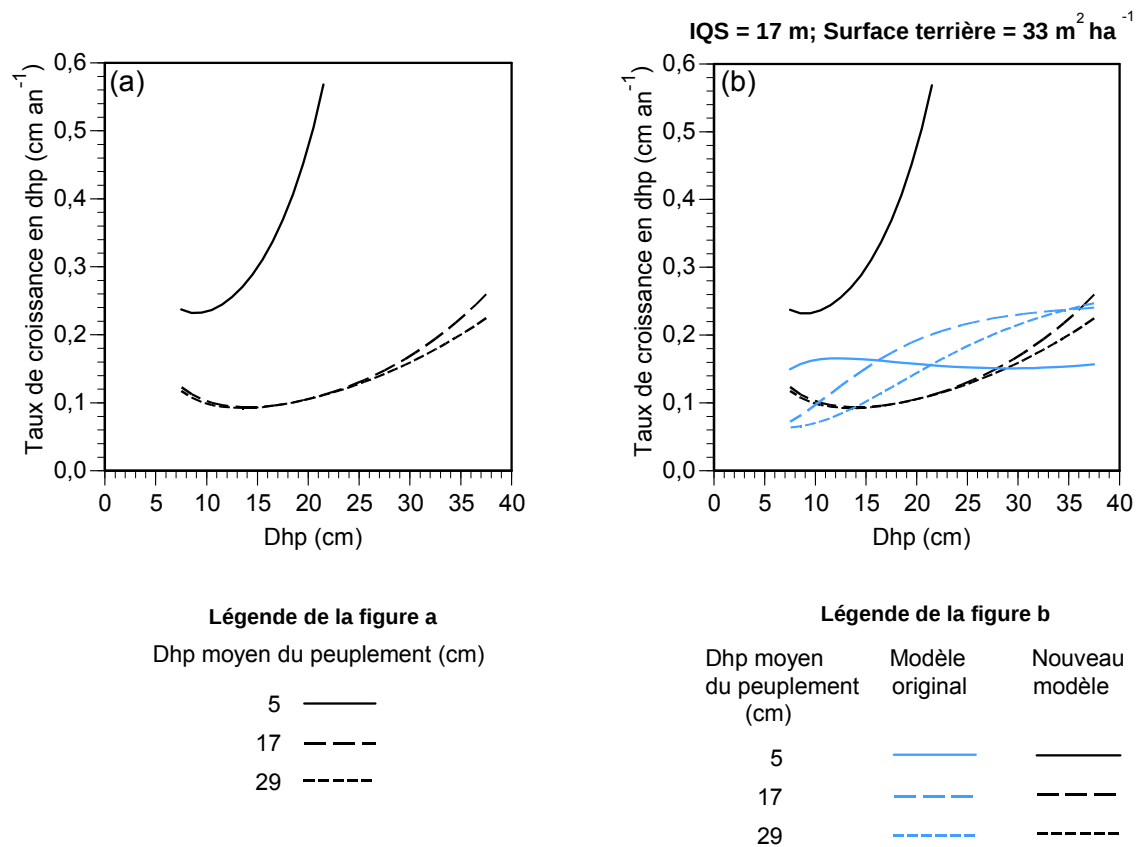
Annexe 3.4 : Taux de croissance en dhp prédit pour le sapin baumier en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



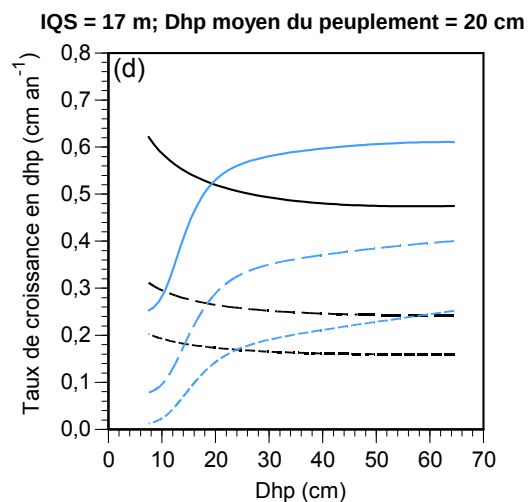
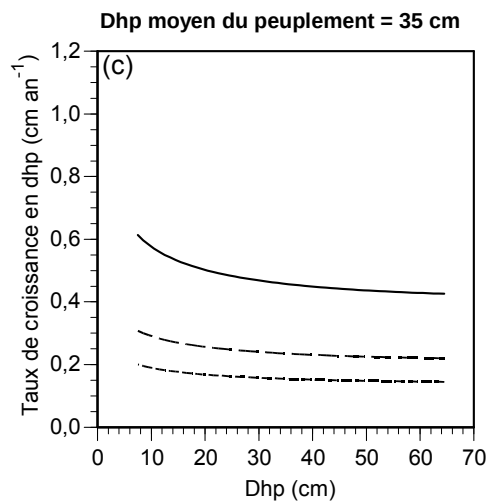
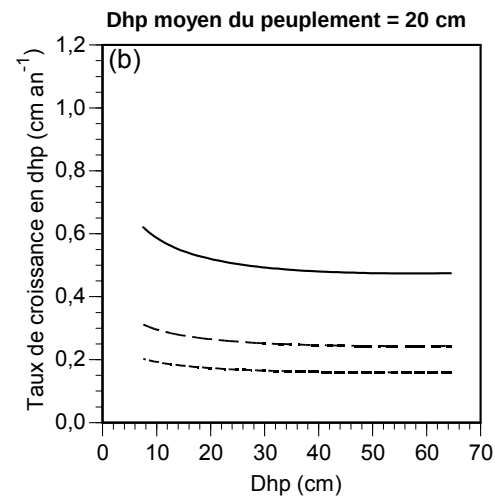
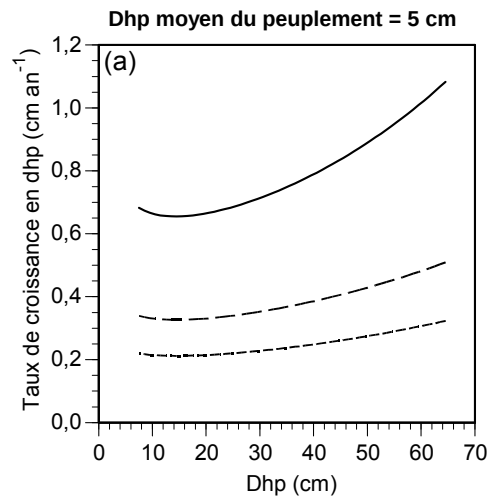
Annexe 3.5 : Taux de croissance en dhp prédit pour l'épinette blanche plantée en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



Annexe 3.6 : Taux de croissance en dhp prédit pour le peuplier faux-tremble en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



Annexe 3.7 : Taux de croissance en dhp prédit pour le bouleau blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b). (IQS: Indice de qualité de station).



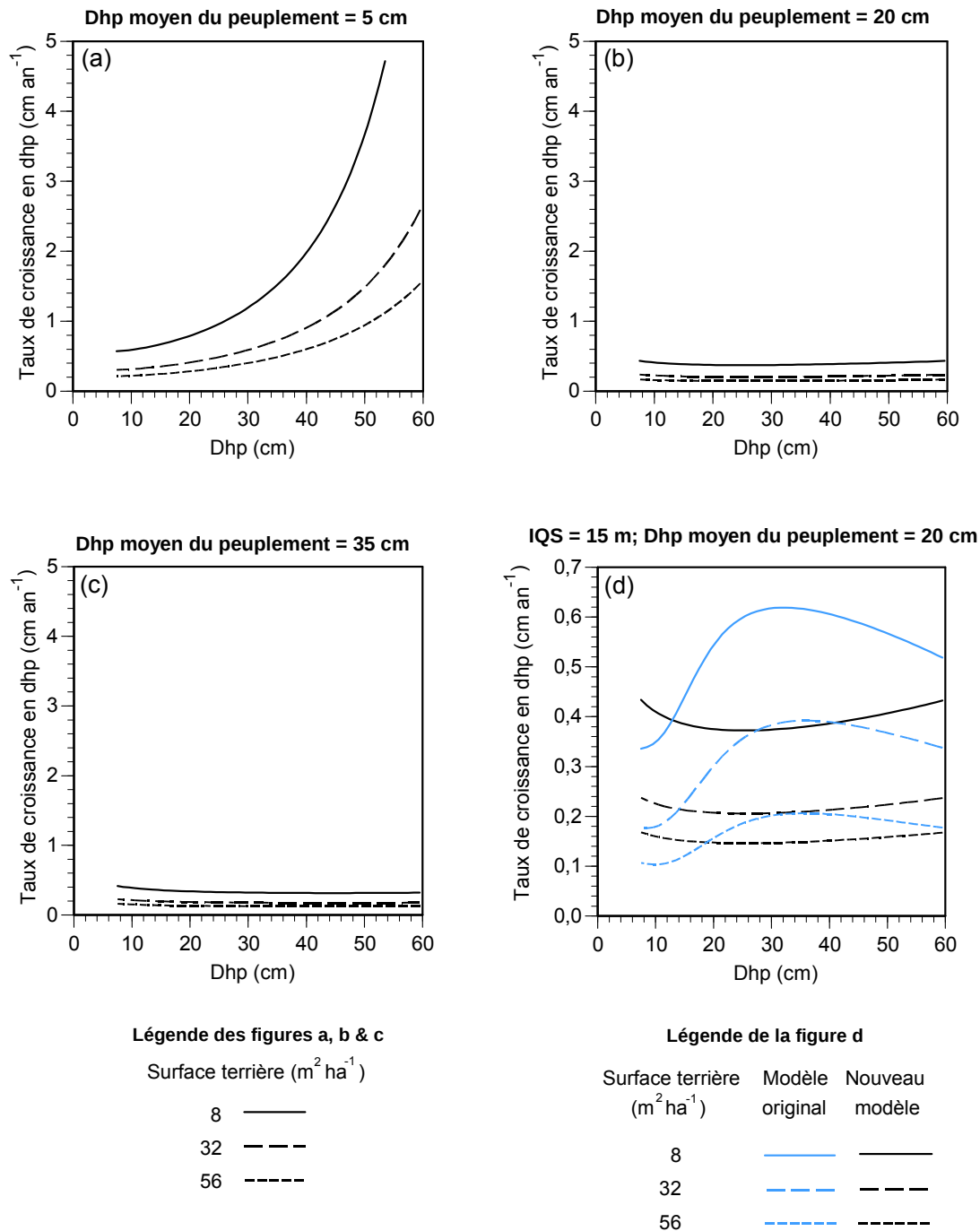
Légende des figures a, b & c
Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)

5 ———
25 - - - -
45 - - - - -

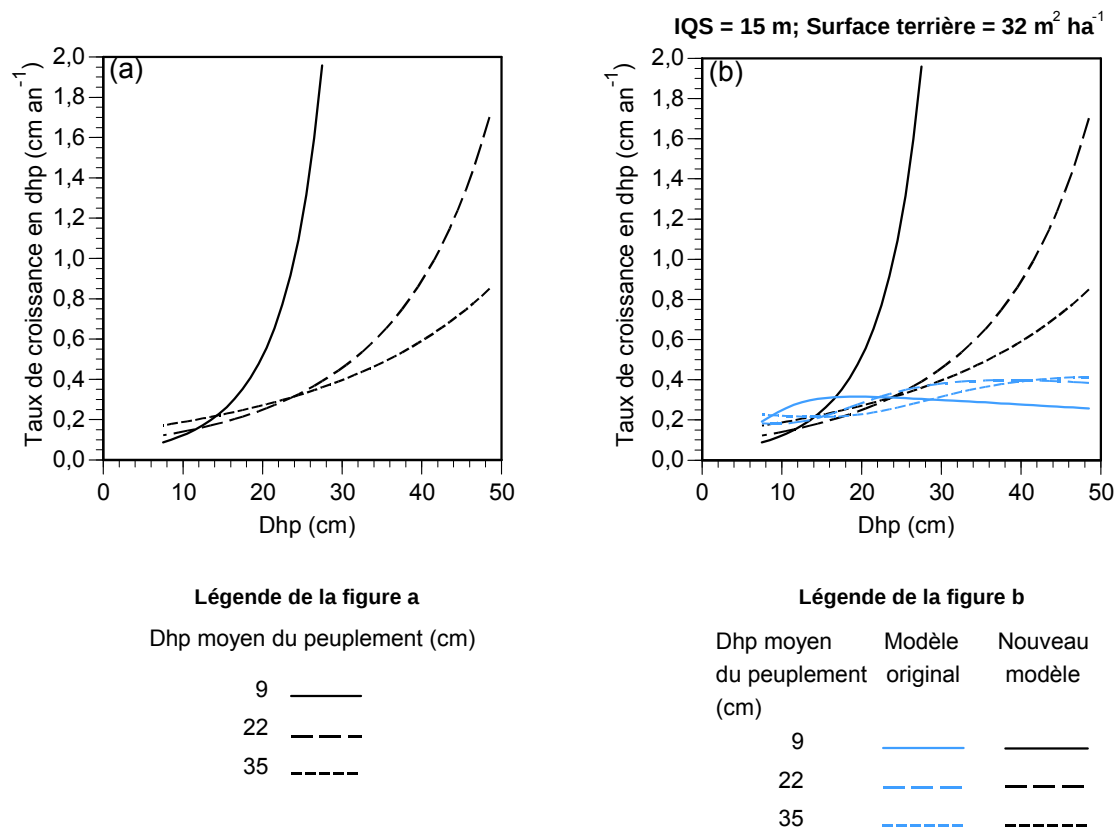
Légende de la figure d

Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Modèle original	Nouveau modèle
5	— (solid black)	— (solid blue)
25	- - (dashed black)	- - (dashed blue)
45	- - - (dotted black)	- - - (dotted blue)

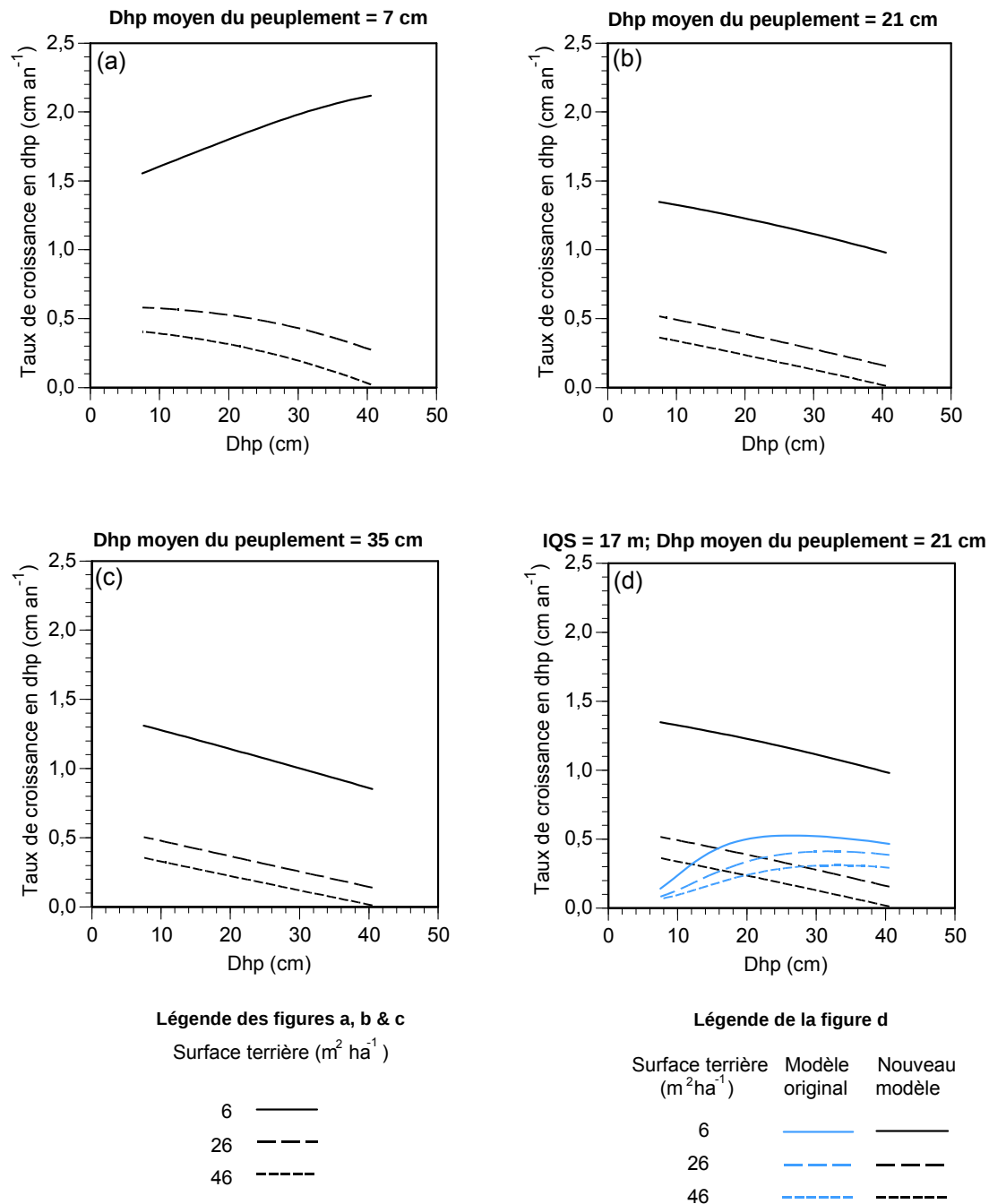
Annexe 3.8 : Taux de croissance en dhp prédit pour l'érable à sucre en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



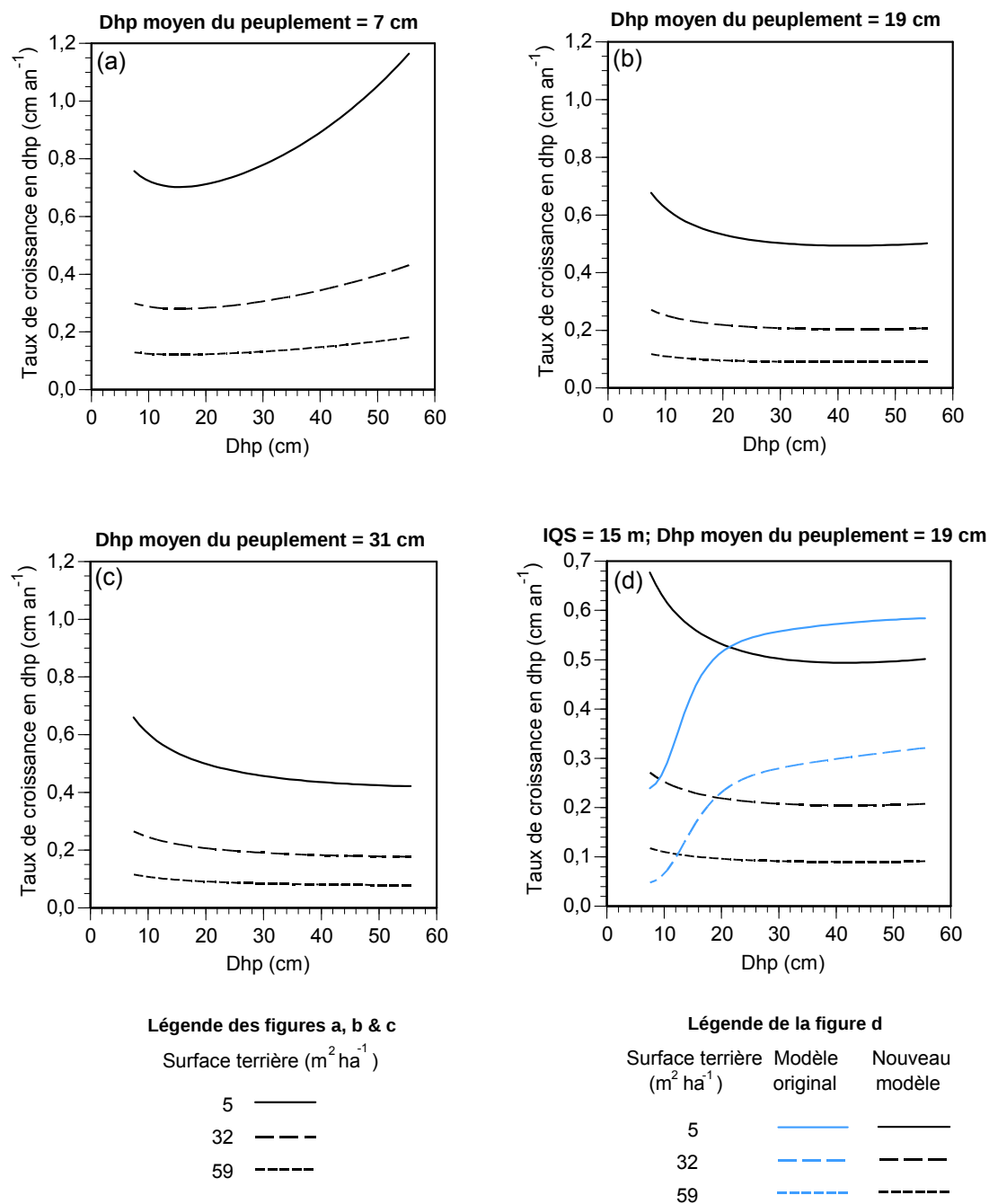
Annexe 3.9 : Taux de croissance en dhp prédit pour le pin blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



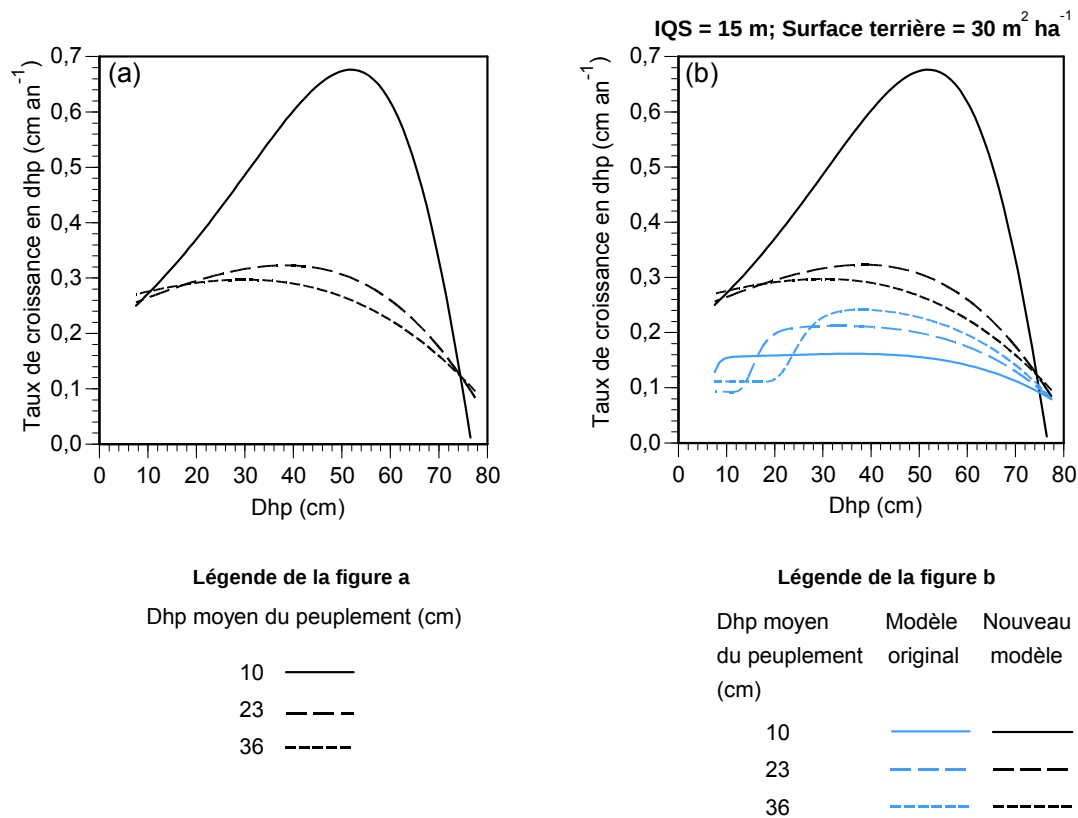
Annexe 3.10 : Taux de croissance en dhp prédit pour le pin blanc planté en fonction du dhp pour différentes conditions de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b). (IQS : Indice de qualité de station).



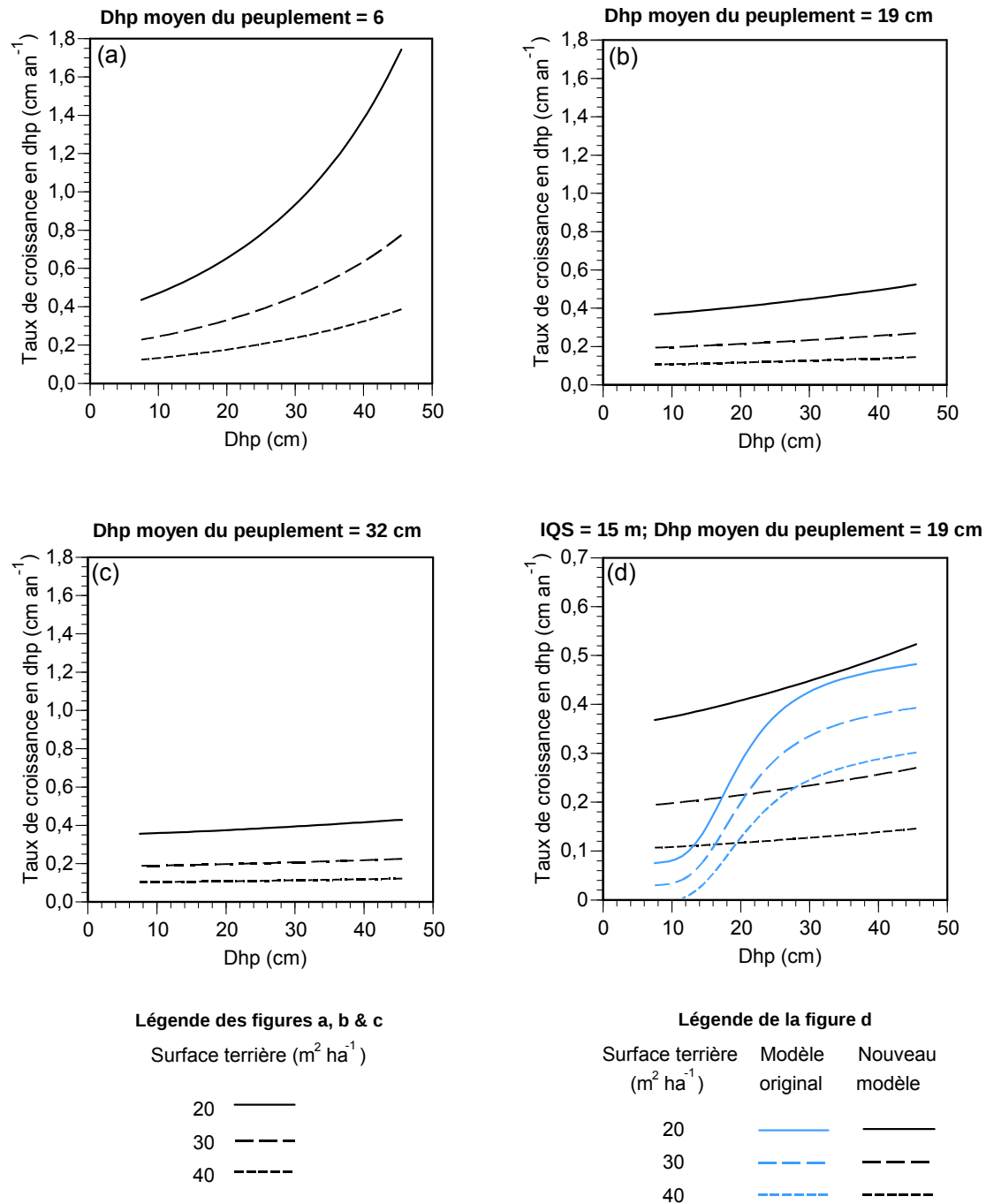
Annexe 3.11 : Taux de croissance en dhp prédit pour le pin rouge planté en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



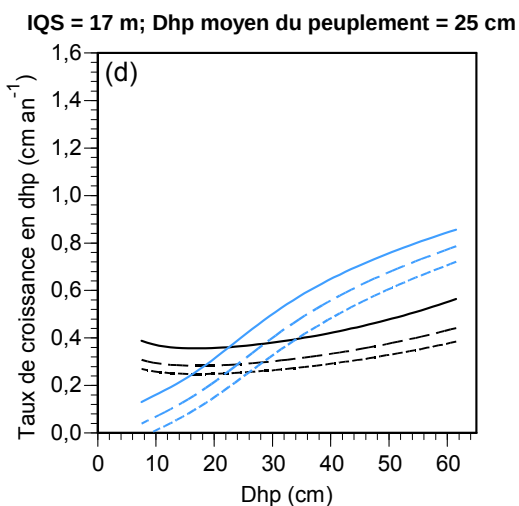
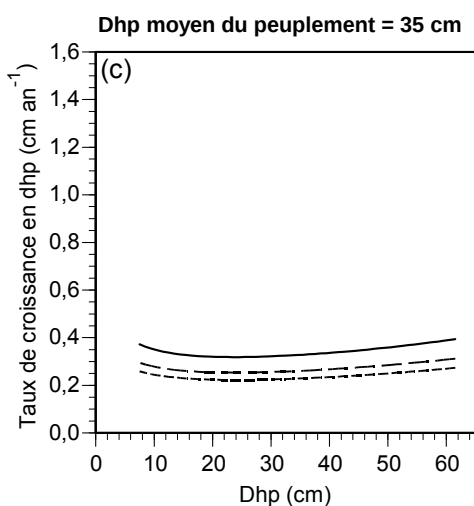
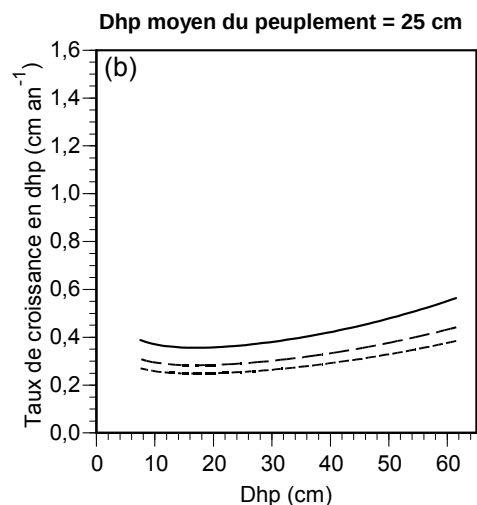
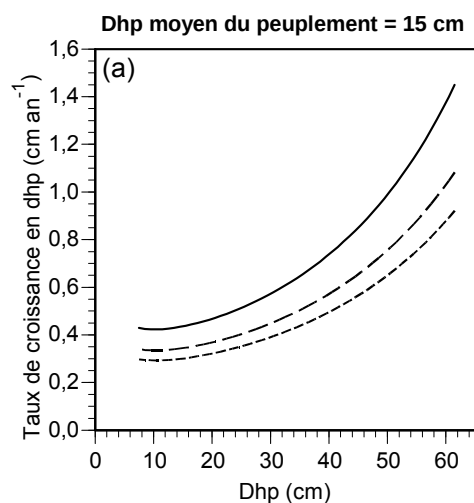
Annexe 3.12 : Taux de croissance en dhp prédit pour le hêtre à grandes feuilles en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



Annexe 3.13 : Taux de croissance en dhp prédit pour le bouleau jaune en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b). (IQS : Indice de qualité de station).



Annexe 3.14 : Taux de croissance en dhp prédit pour le tilleul d'Amérique en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



Légende des figures a, b & c

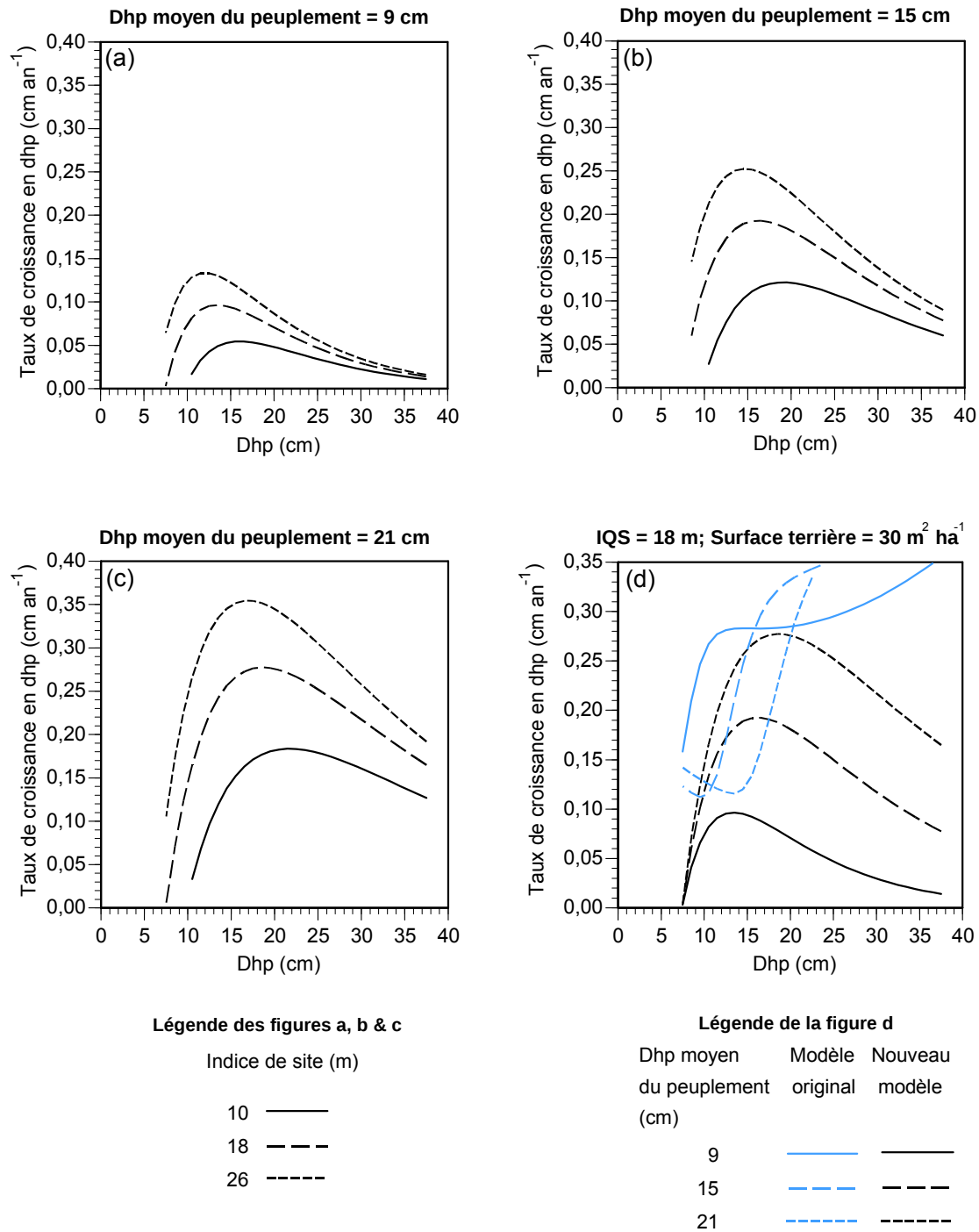
Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)

10 ———
20 - - - -
30 - - - - -

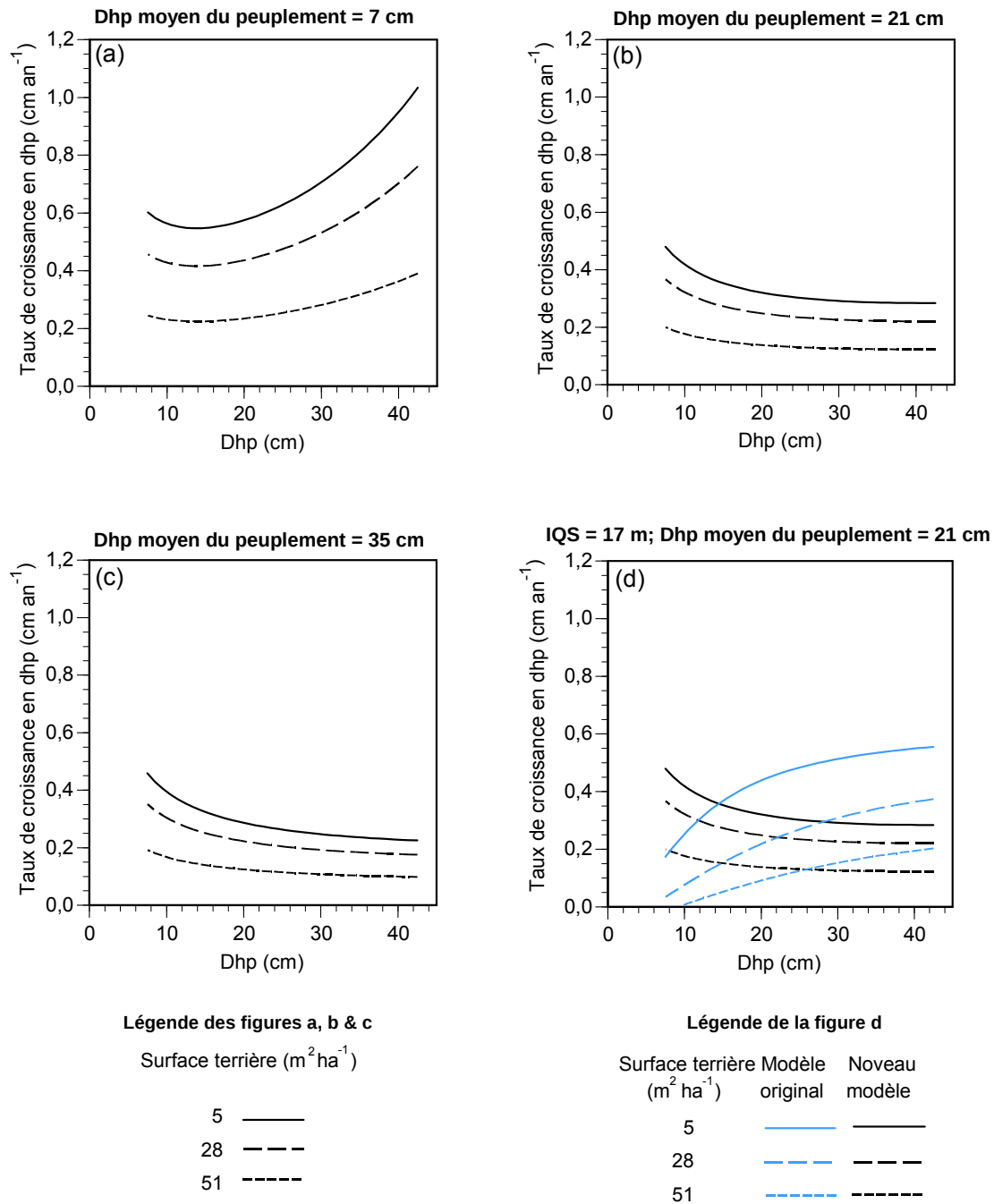
Légende de la figure d

Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Modèle original	Nouveau modèle
10	— (black)	— (blue)
20	- - (black)	- - (blue)
30	- - - (black)	- - - (blue)

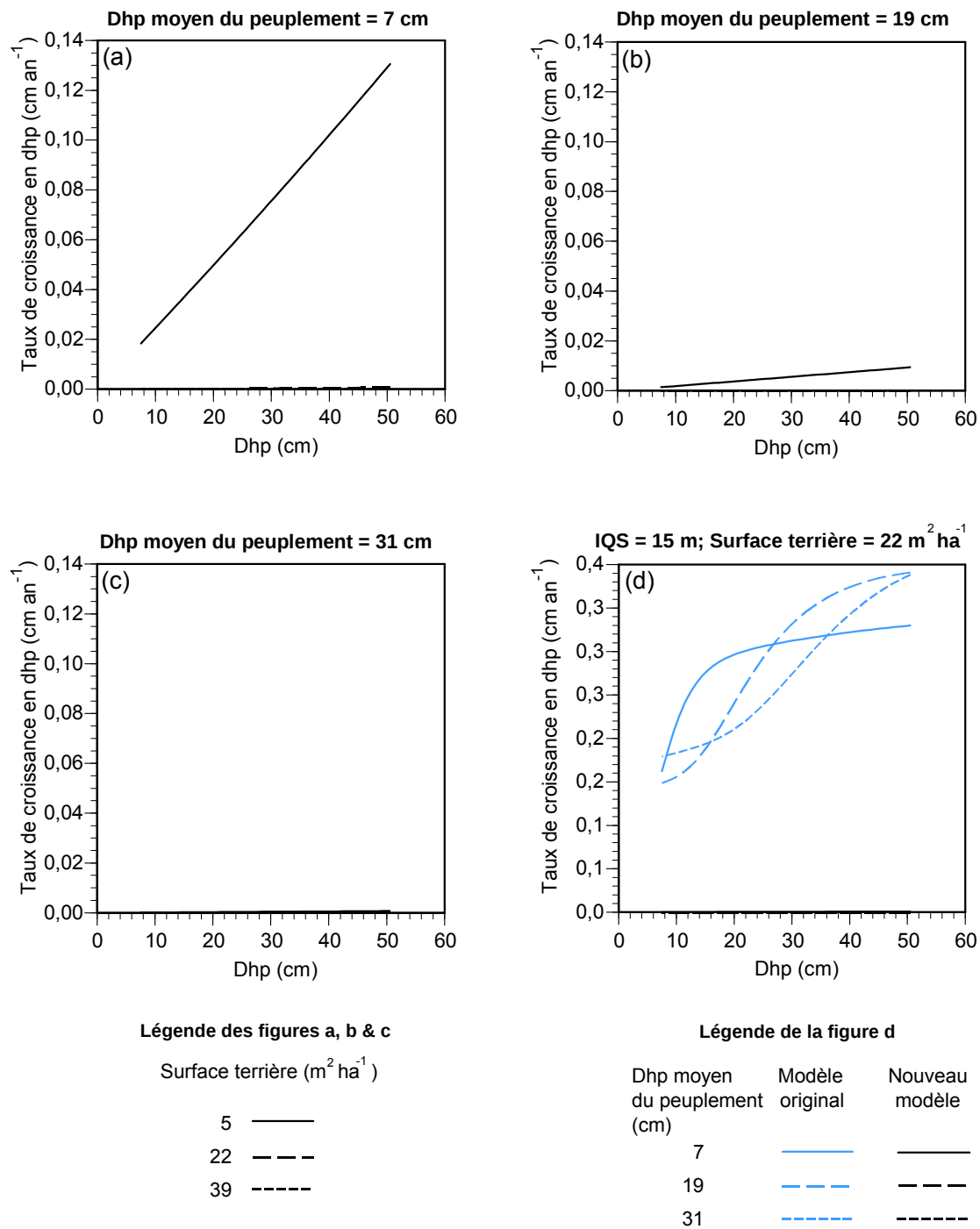
Annexe 3.15 : Taux de croissance en dhp prédit pour l'érable argenté en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



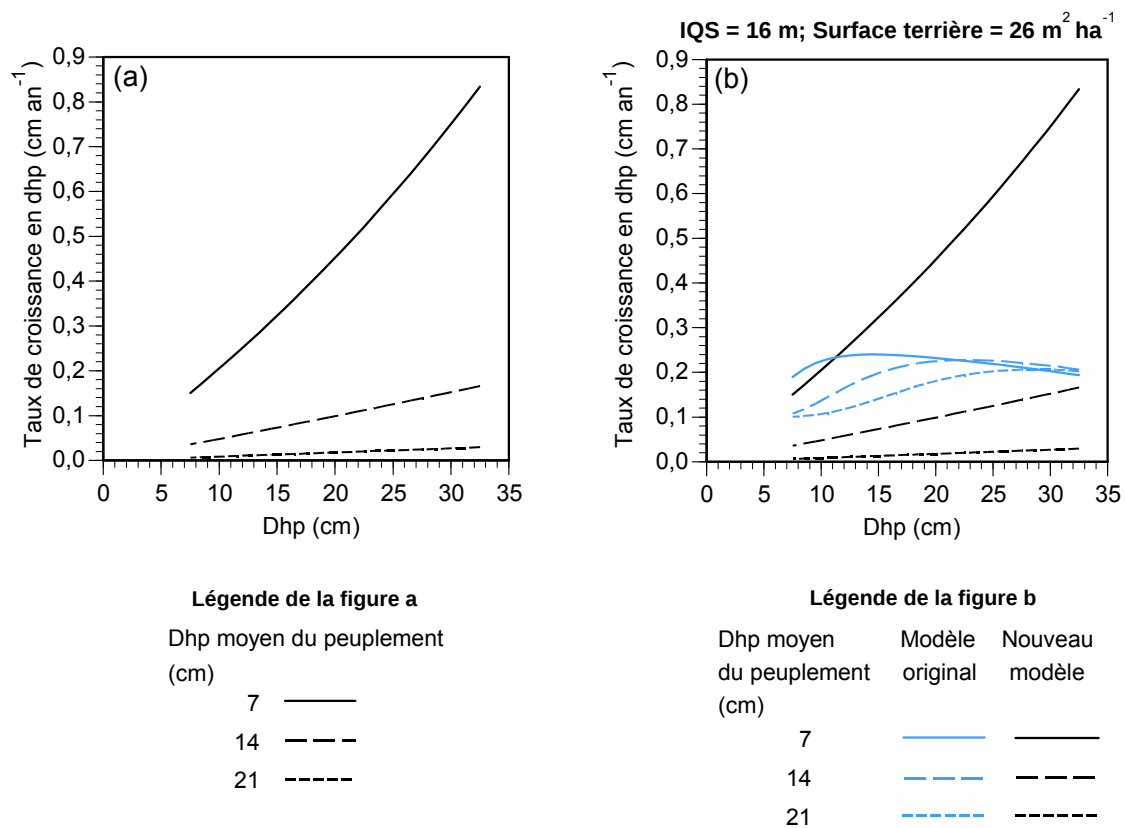
Annexe 3.16 : Taux de croissance en dhp prédit pour le peuplier baumier en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions d'indice de site et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).



Annexe 3.17 : Taux de croissance en dhp prédit pour le chêne rouge en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et du dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).

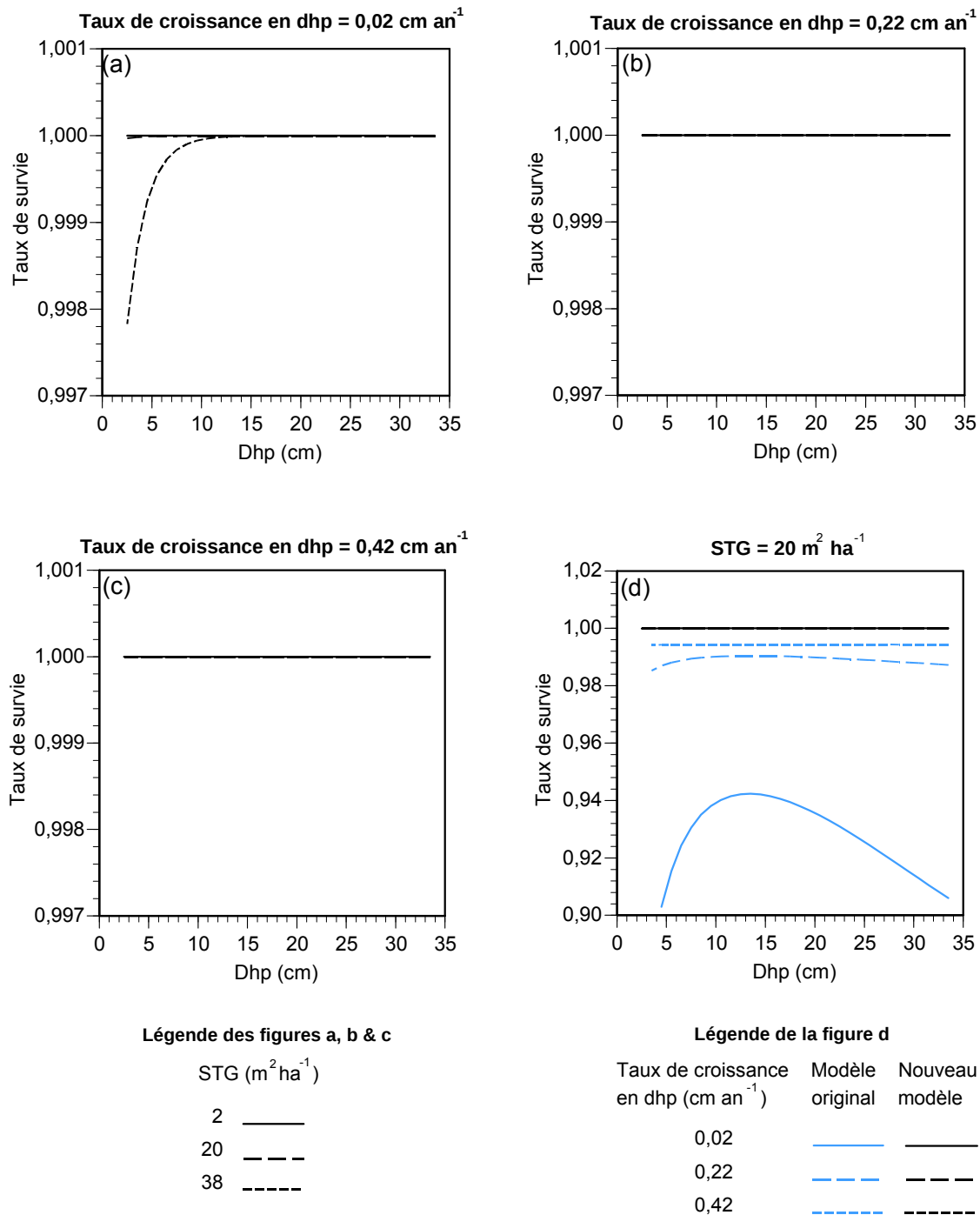


Annexe 3.18 : Taux de croissance en dhp prédit pour le cerisier tardif en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d). (IQS : Indice de qualité de station).

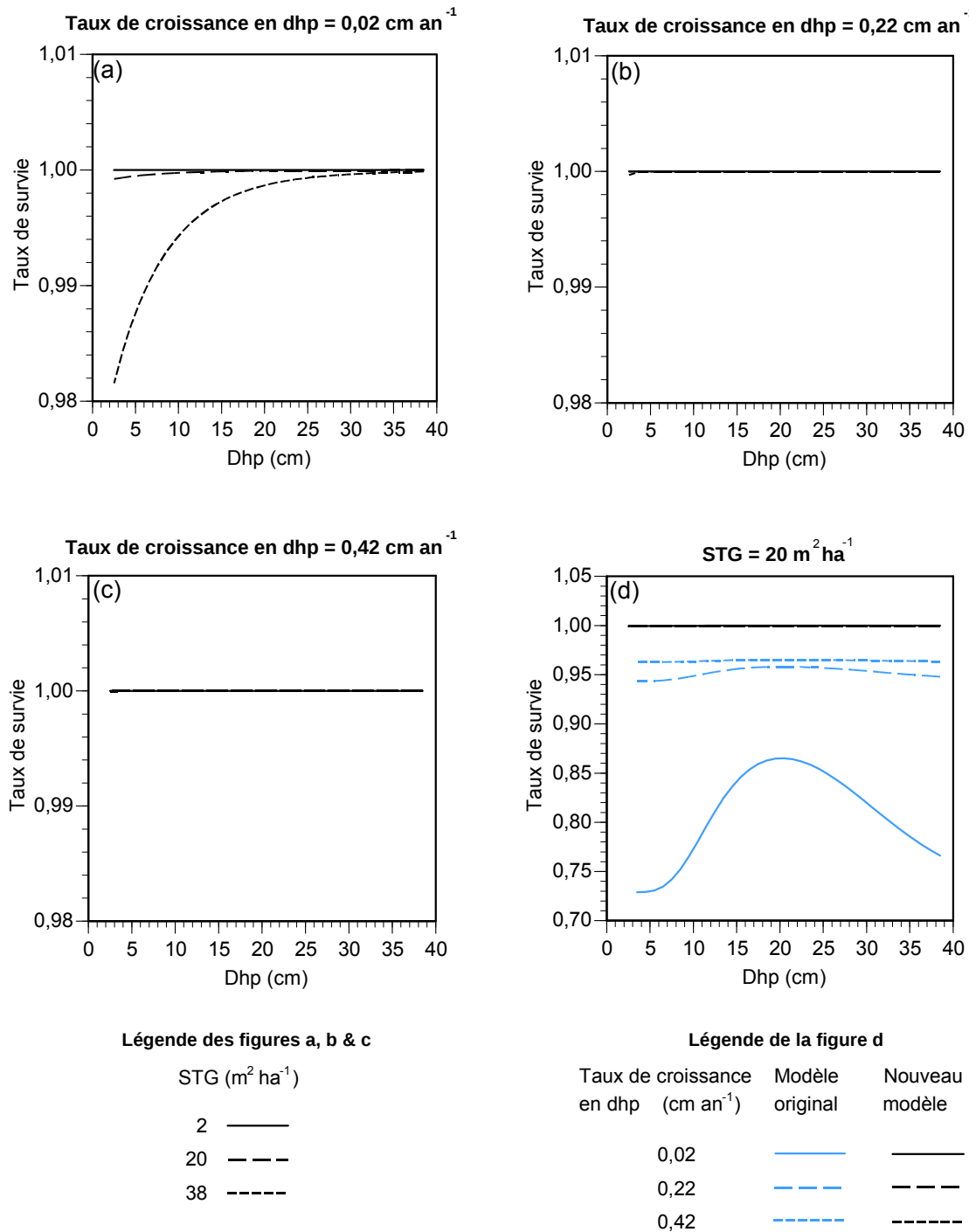


Annexe 3.19 : Taux de croissance en dhp prédit pour le caryer en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b). (IQS : Indice de qualité de station).

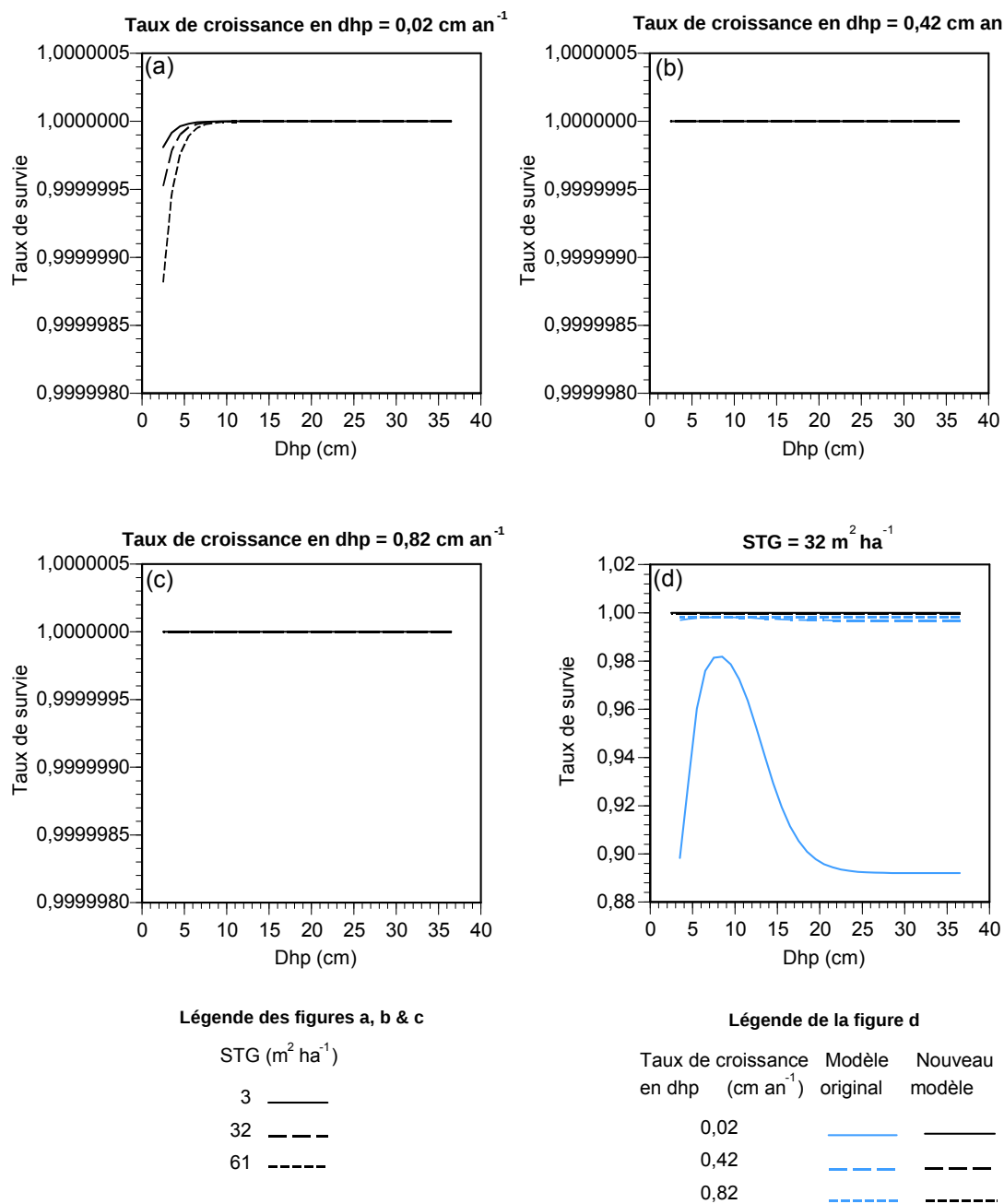
Annexe 4. Analyse de cohérence biologique pour les modèles de taux de survie



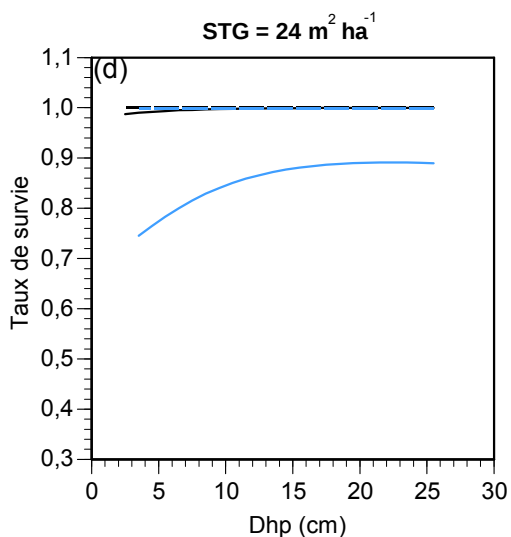
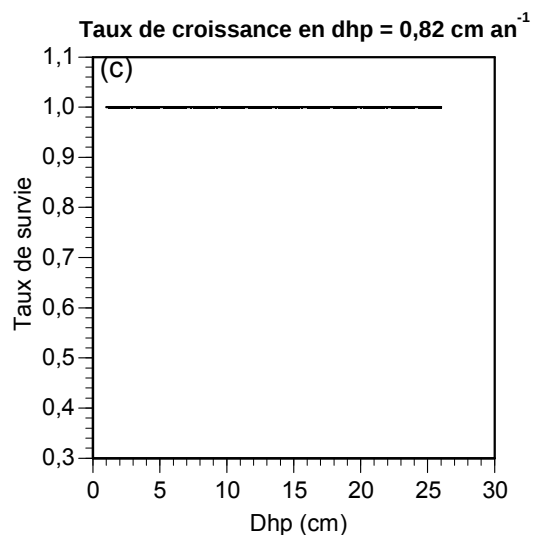
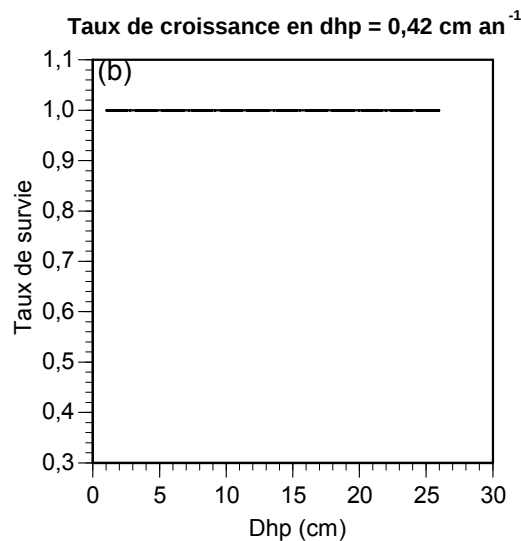
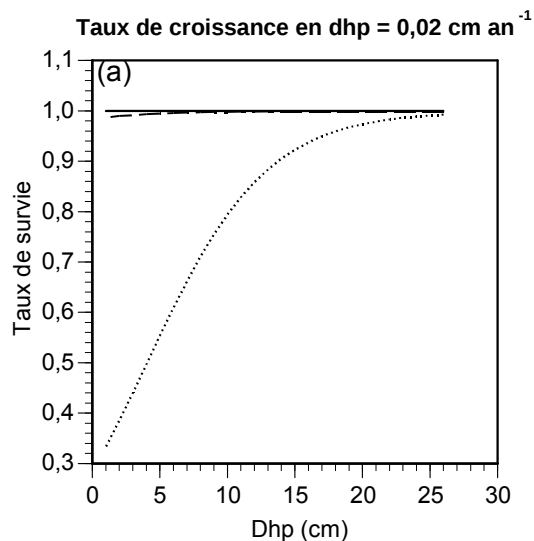
Annexe 4.1 : Taux de survie prédit pour l'épinette noire en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



Annexe 4.2 : Taux de survie prédit pour le pin gris en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



Annexe 4.3 : Taux de survie prédit pour le sapin baumier en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



Légende des figures a, b & c

STG (m² ha⁻¹)

3 ———

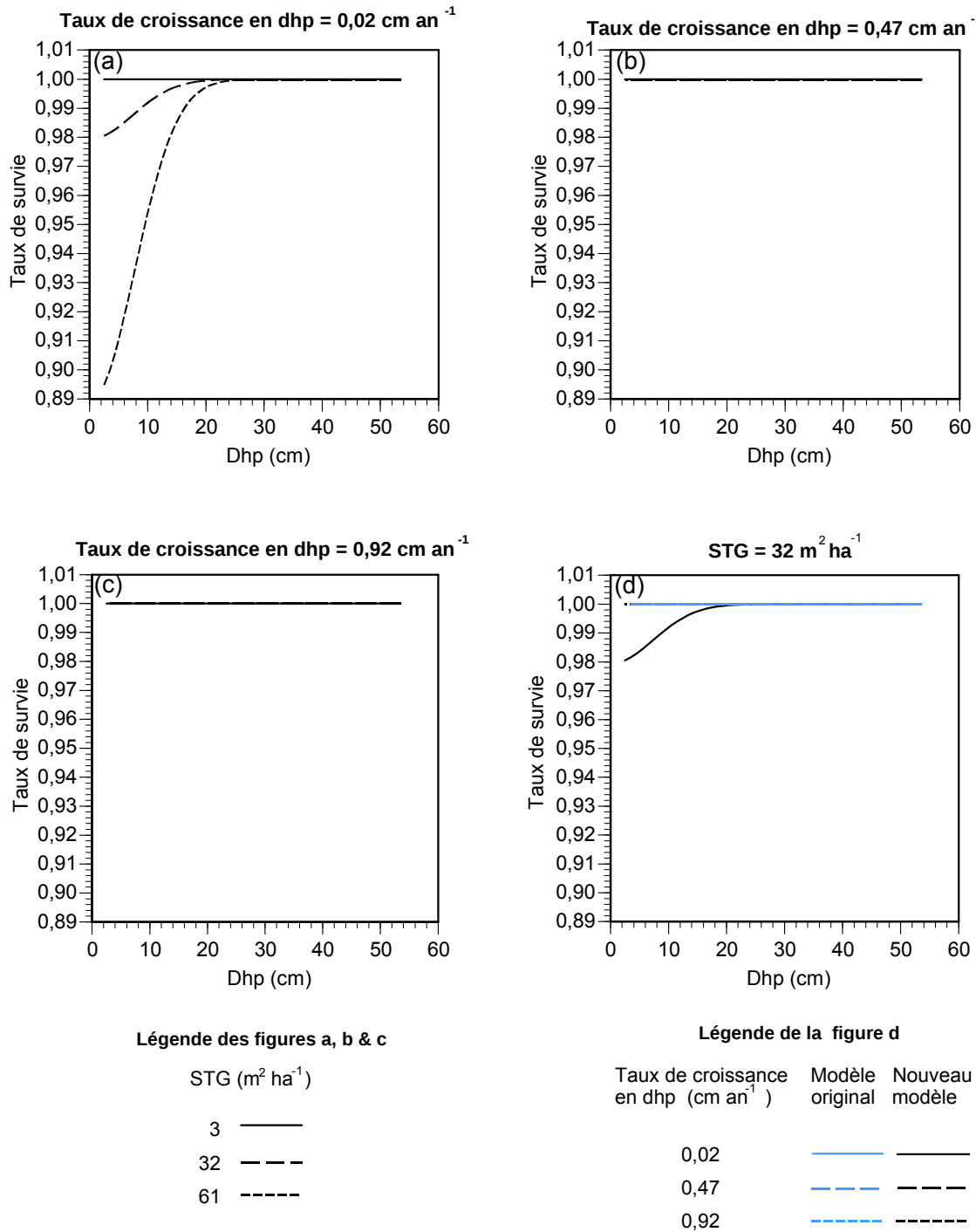
24 - - - -

45 - - - - -

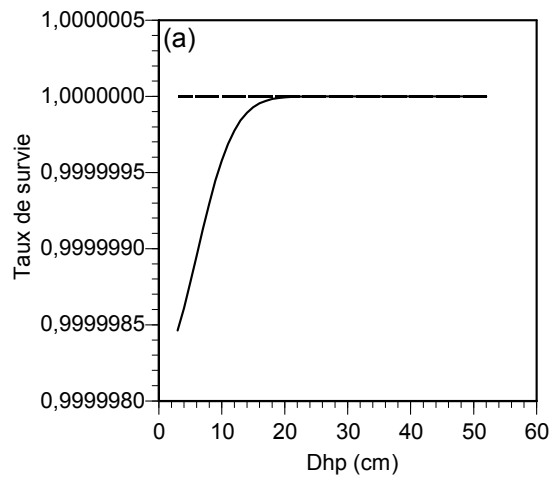
Légende de la figure d

Taux de croissance en dhp	(cm an ⁻¹)	Modèle original	Nouveau modèle
0,02		—	—
0,42		- - -	- - -
0,82		- - - -	- - - -

Annexe 4.4 : Taux de survie prédit pour l'épinette blanche plantée en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).

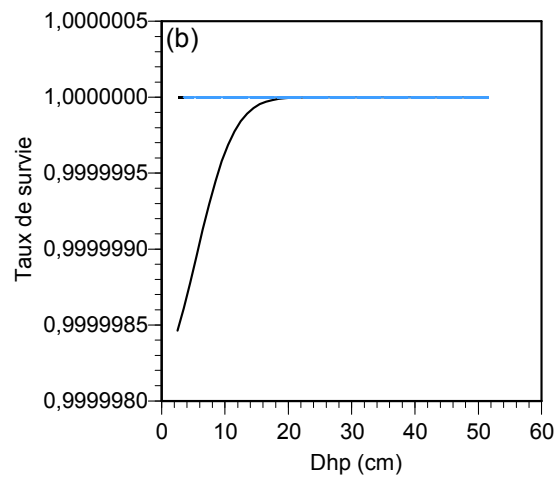


Annexe 4.5 : Taux de survie prédit pour le peuplier faux-tremble en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



Légende de la figure a

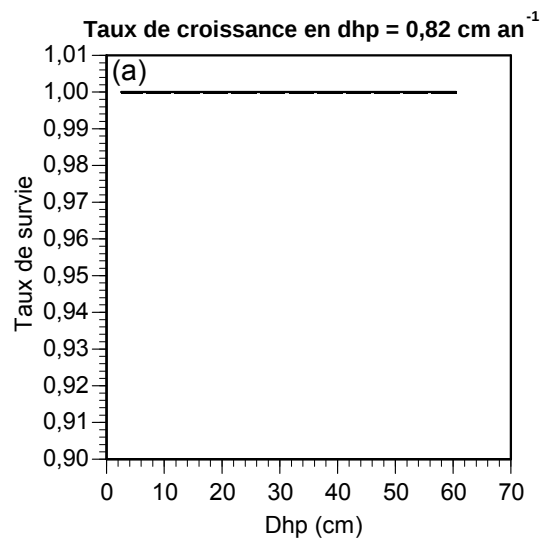
Taux de croissance en dhp (cm an ⁻¹)	
0,02	———
0,32	- - - -
0,62	- - - - -



Légende de la figure b

Taux de croissance en dhp (cm an ⁻¹)	Modèle original	Nouveau modèle
0,02	——— (blue)	——— (black)
0,32	- - - - (blue)	- - - - (black)
0,62	- - - - - (blue)	- - - - - (black)

Annexe 4.6 : Taux de survie prédit pour le bouleau blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



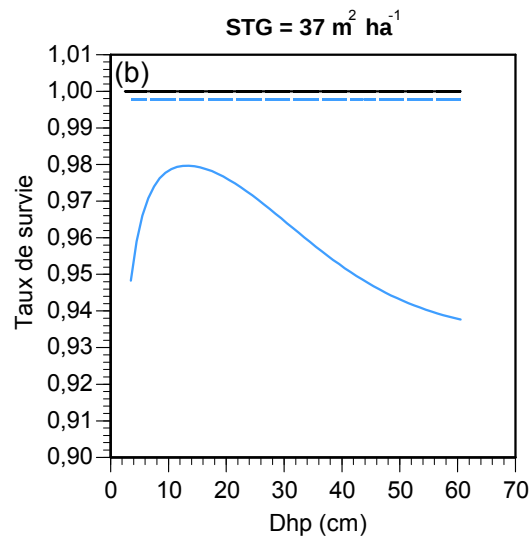
Légende de la figure a

STG (m² ha⁻¹)

3 ———

37 - - - -

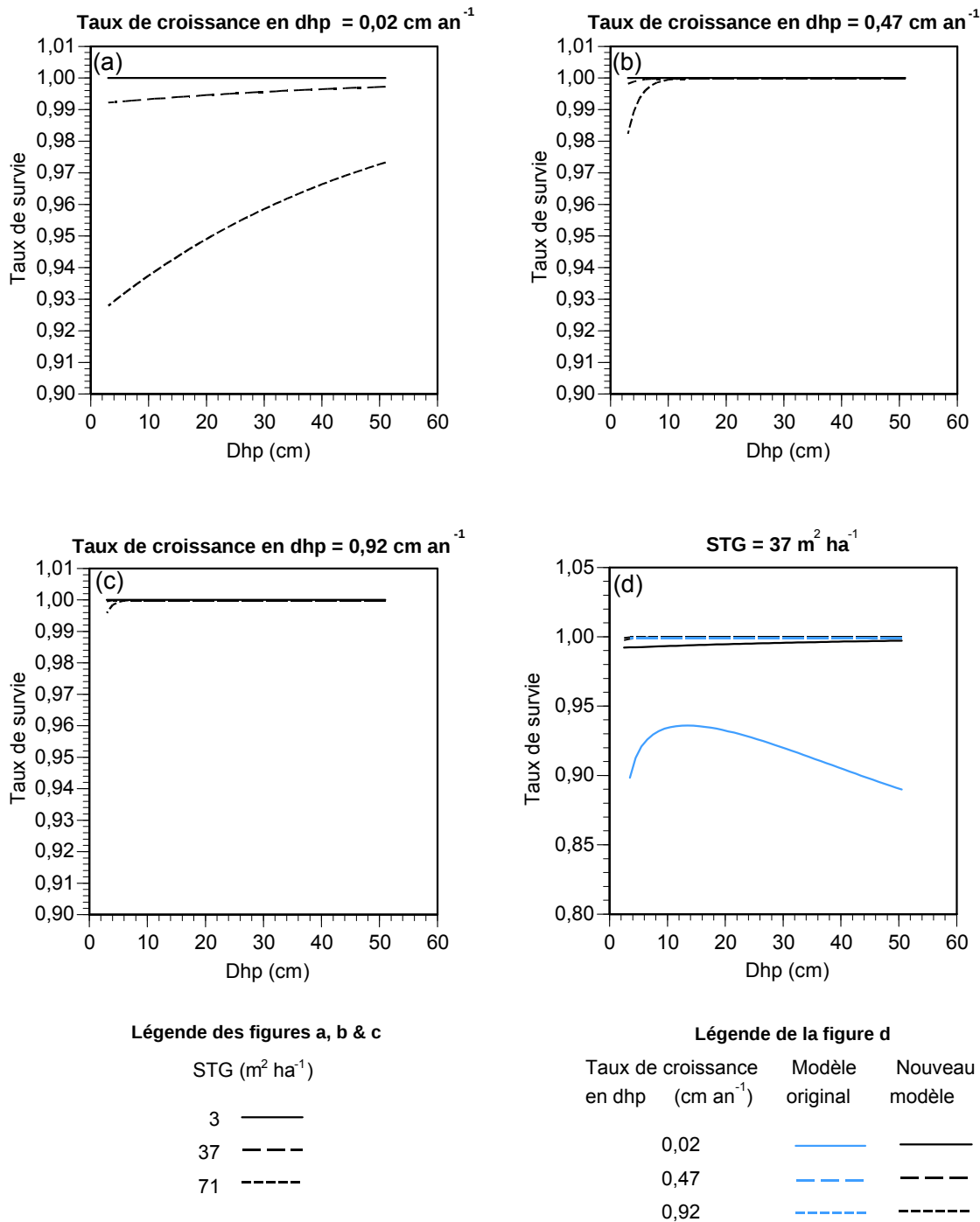
71 - - - - -



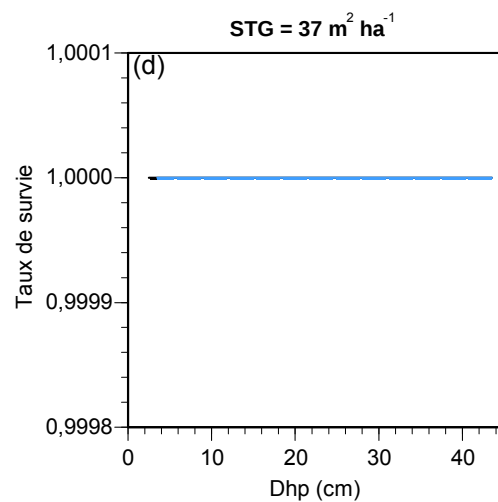
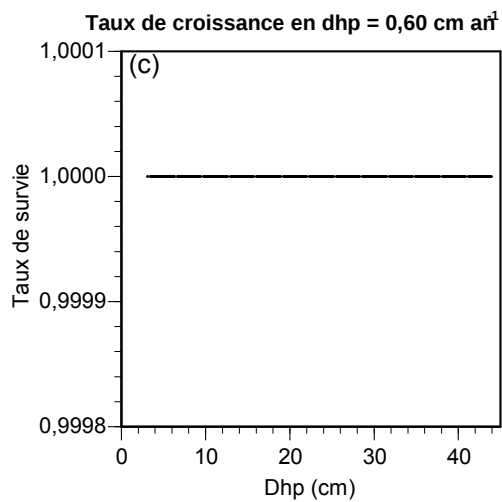
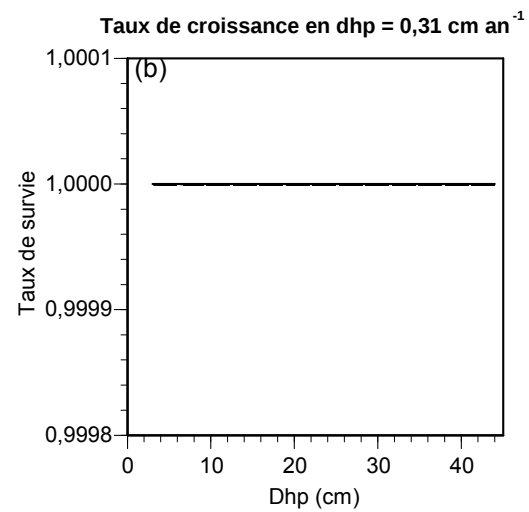
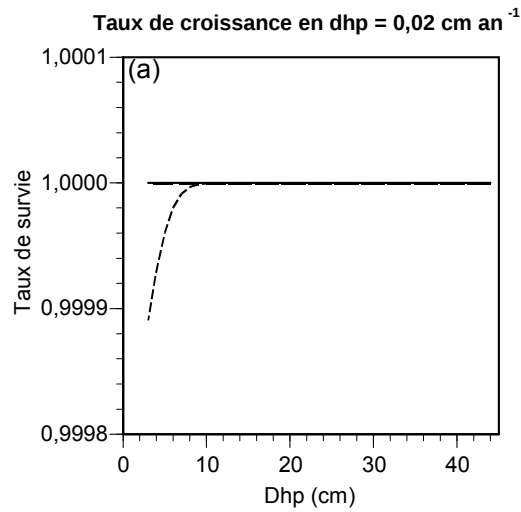
Légende de la figure b

Taux de croissance en dhp (cm an ⁻¹)	Modèle original	Nouveau modèle
0,02	———	———
0,42	- - - -	- - - -
0,82	- - - - -	- - - - -

Annexe 4.7 : Taux de survie prédit pour l'érable à sucre en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



Annexe 4.8 : Taux de survie prédit pour le pin blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



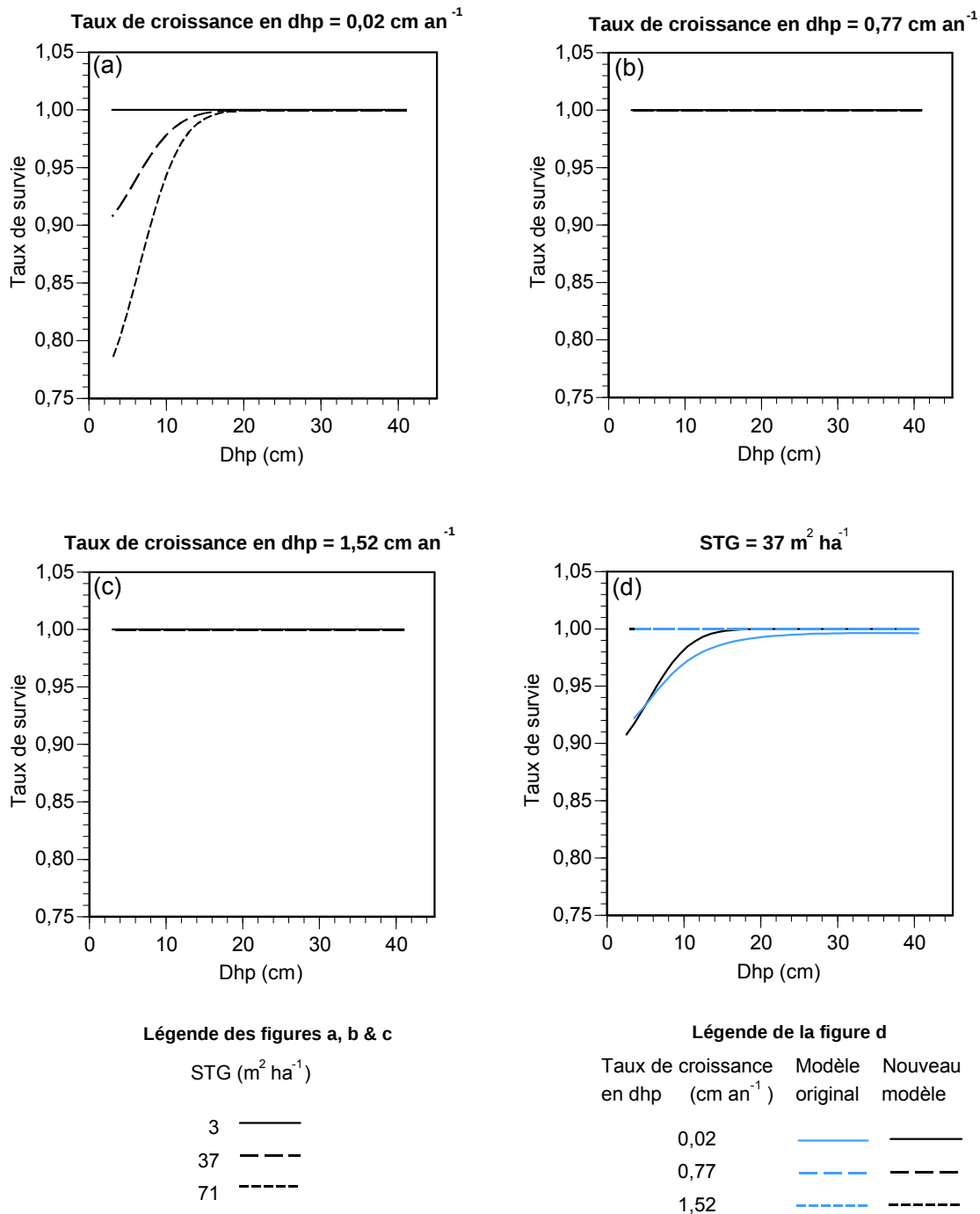
Légende des figures a, b & c

STG (m ² ha ⁻¹)	
3	—
37	- - -
71	- - - -

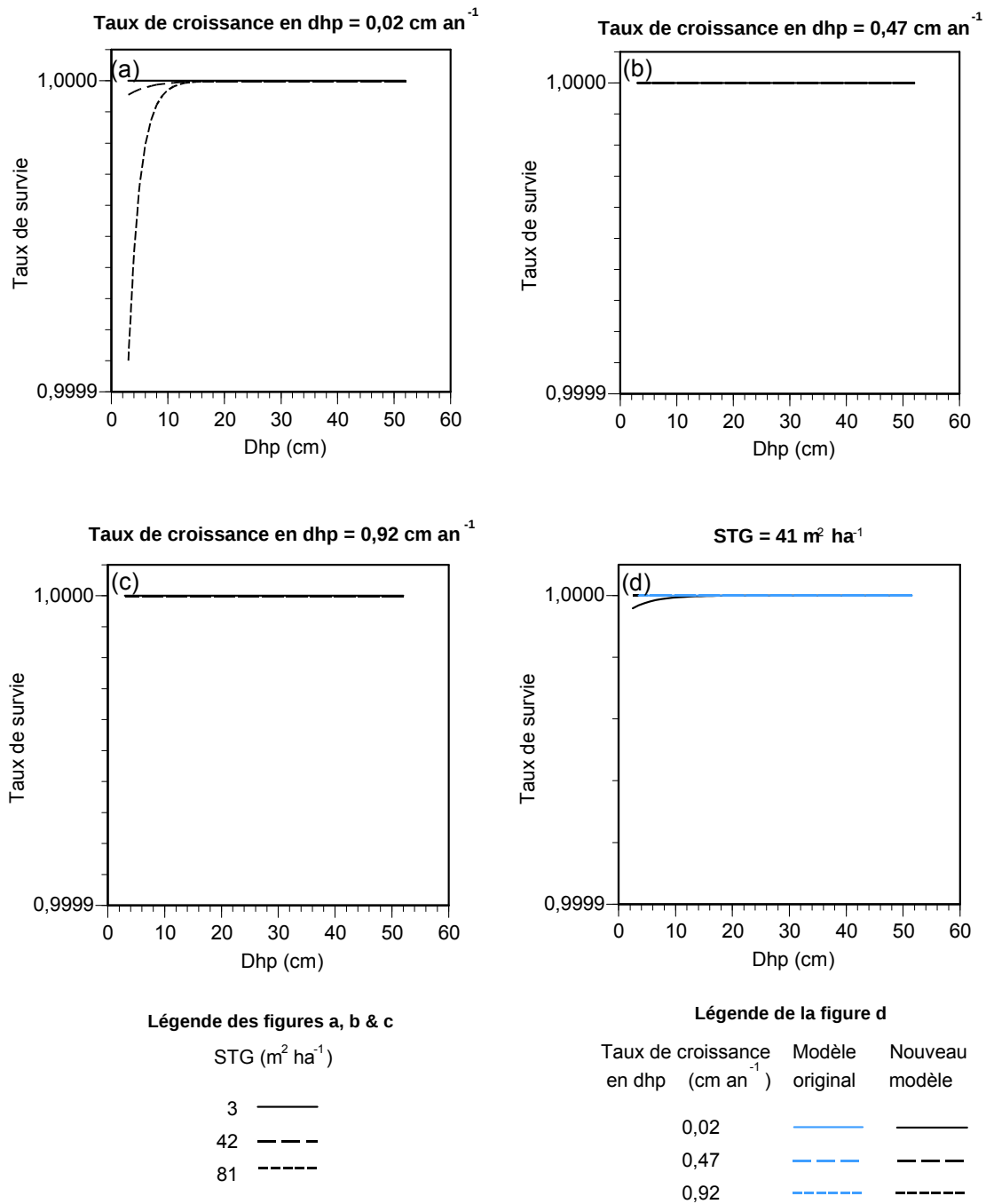
Légende de la figure d

Taux de croissance en dhp (cm an ⁻¹)	Modèle original	Nouveau modèle
0,02	—	—
0,31	- - -	- - -
0,60	- - - -	- - - -

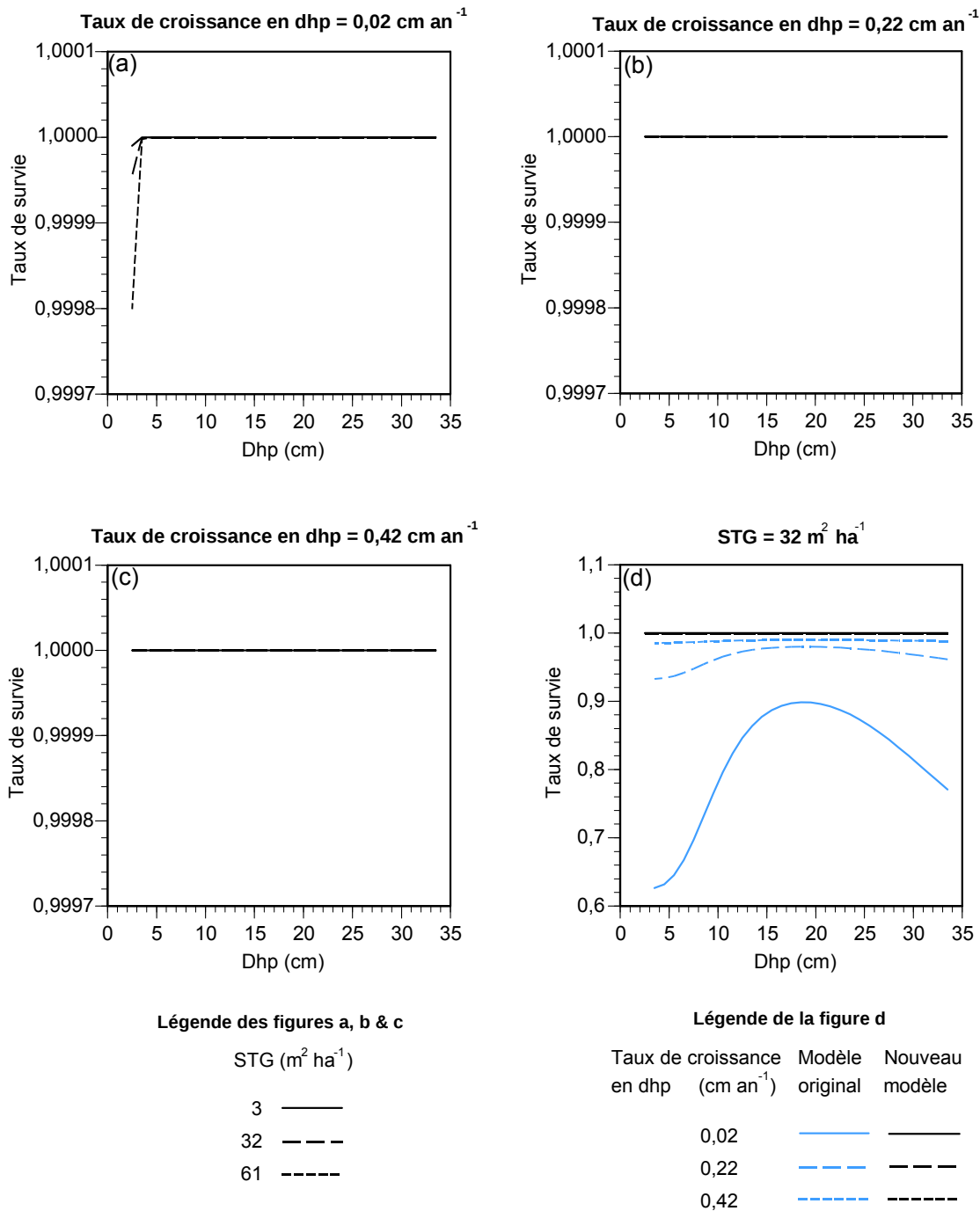
Annexe 4.9 : Taux de survie prédit pour le pin rouge en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



Annexe 4.10 : Taux de survie prédit pour le pin rouge planté en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).

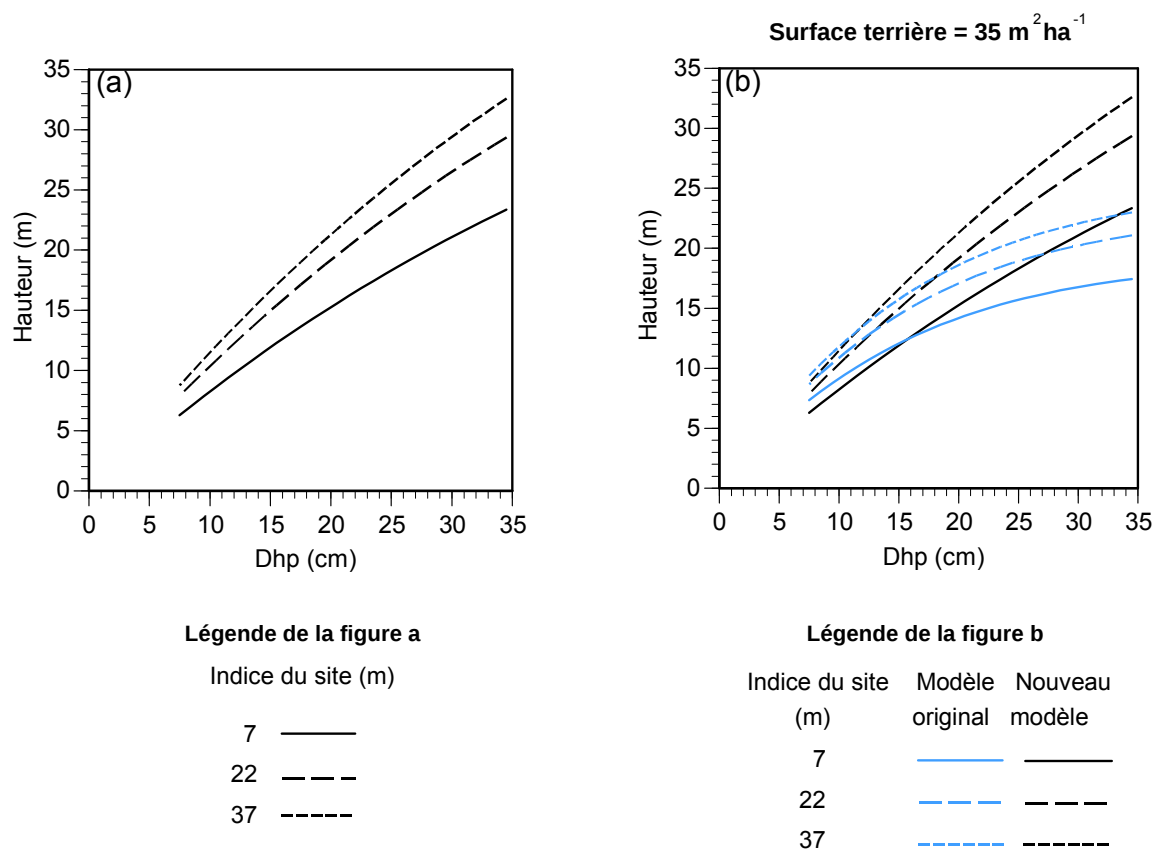


Annexe 4.11 : Taux de survie prédit pour le hêtre à grandes feuilles en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).

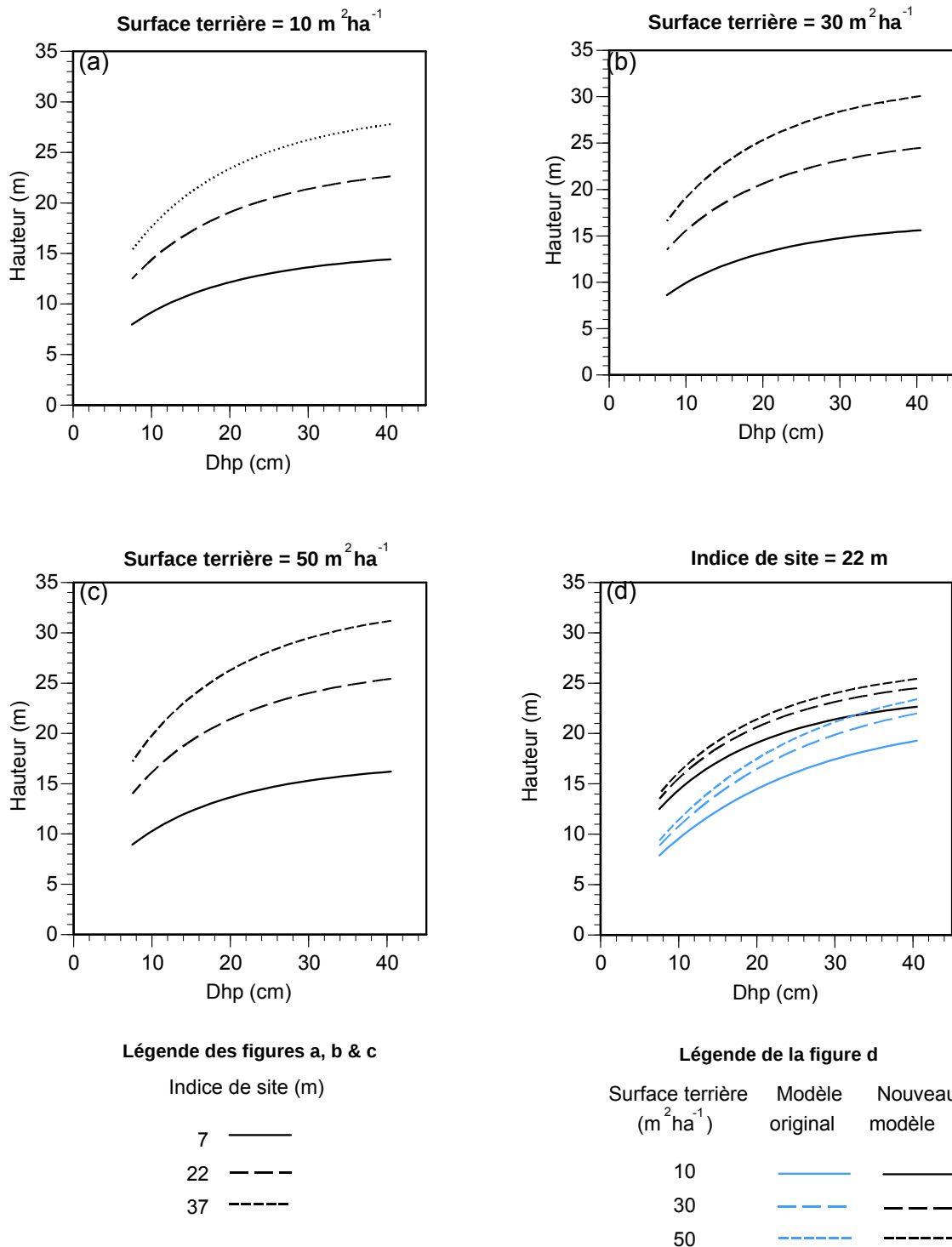


Annexe 4.12 : Taux de survie prédit pour le peuplier baumier en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG et de taux de croissance en dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).

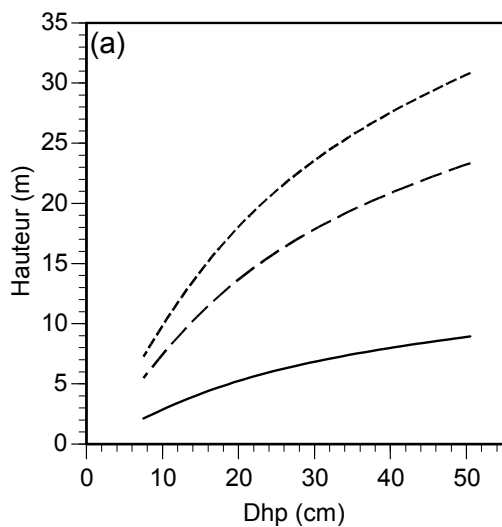
Annexe 5. Analyse de cohérence biologique pour les modèles de hauteur en fonction du dhp



Annexe 5.1 : Hauteur prédite pour l'épinette noire en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions d'indice de site à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



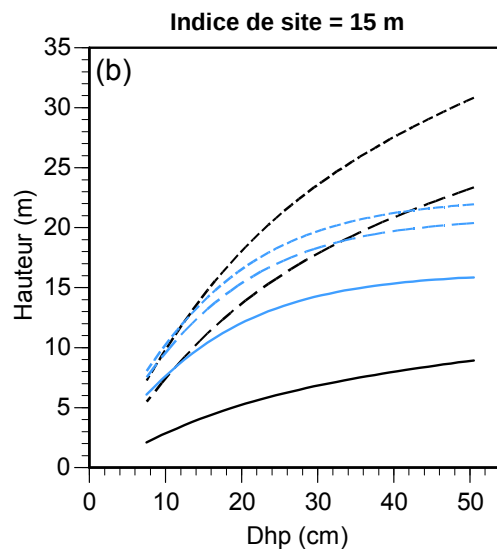
Annexe 5.2 : Hauteur prédite pour le pin gris en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions d'indice de site et de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



Légende de la figure a

Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)

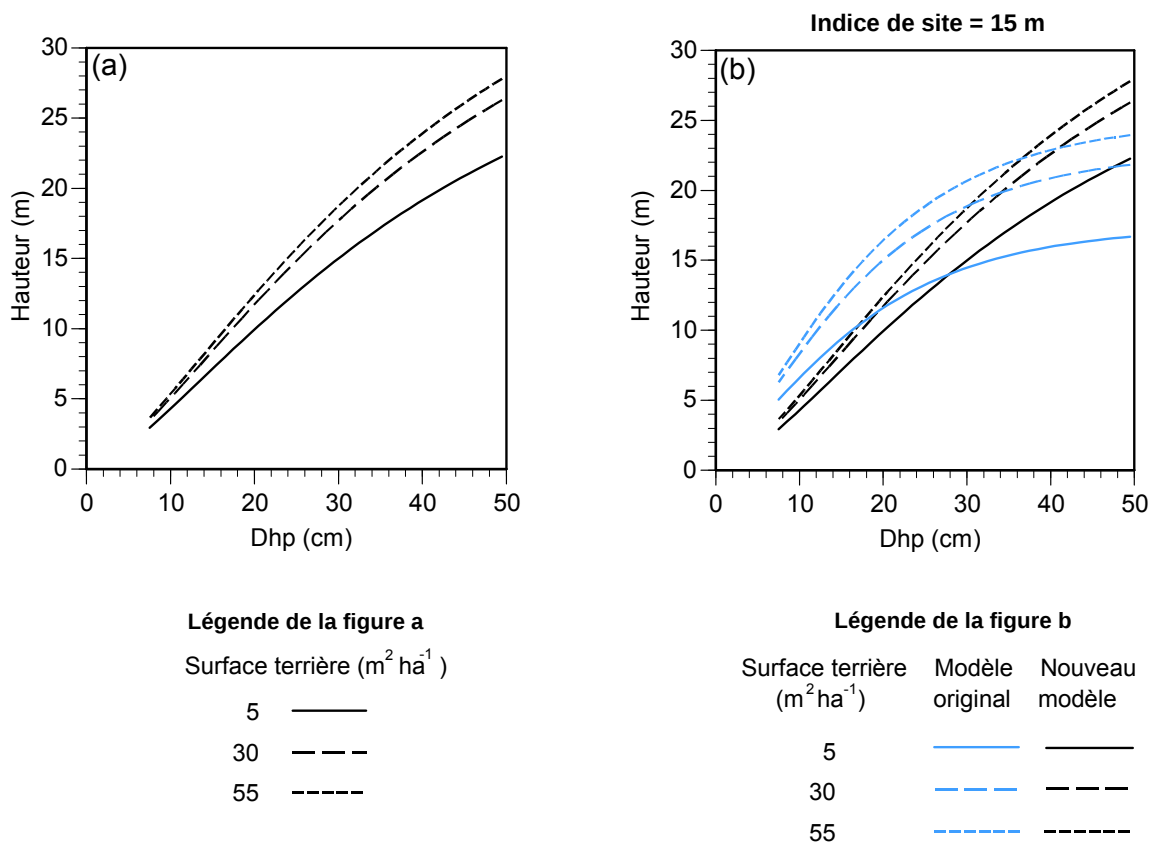
3 ———
 27 - - - -
 51



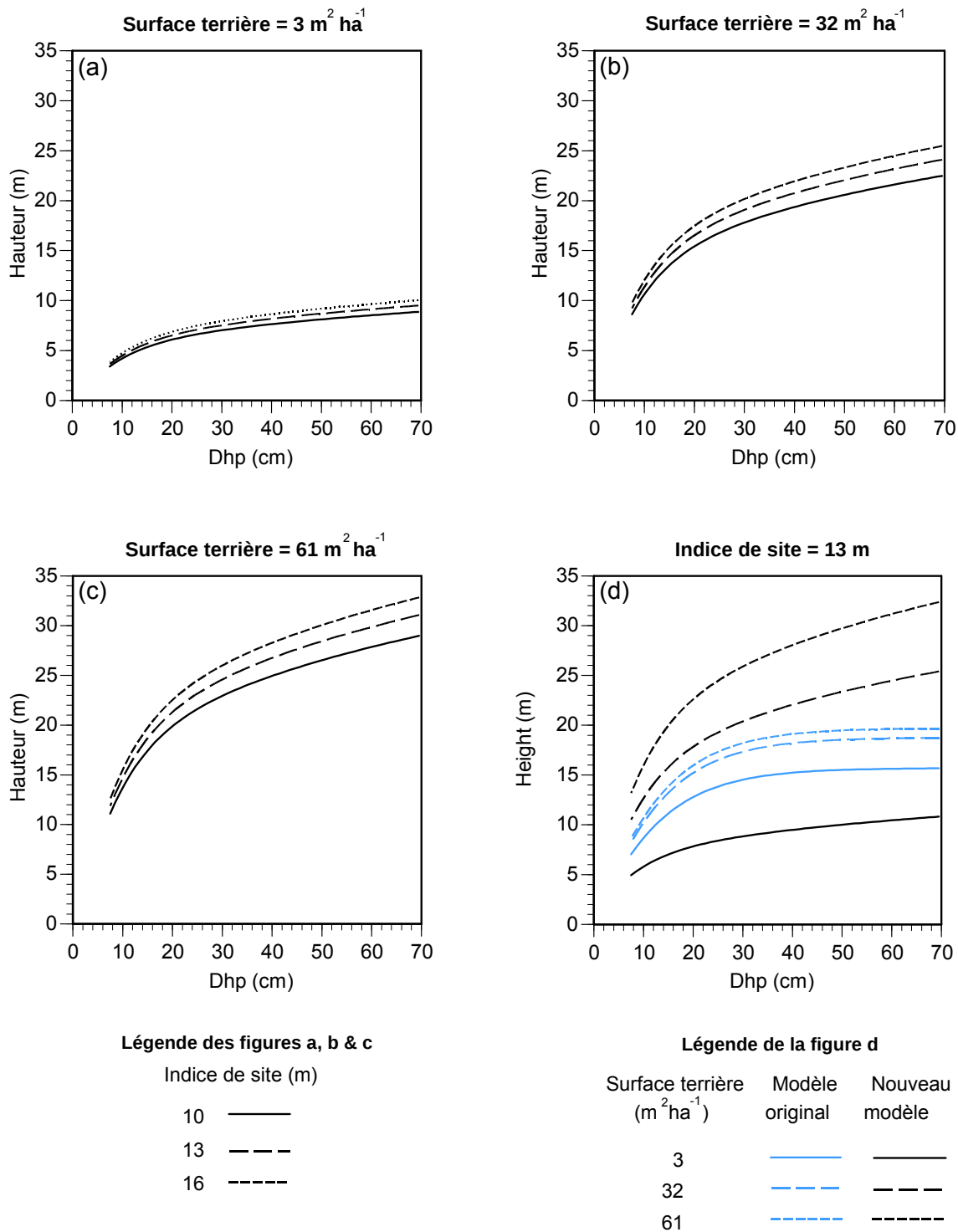
Légende de la figure b

Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Modèle original	Nouveau modèle
3	— (blue)	— (black)
27	- - (blue)	- - (black)
51	. . (blue)	. . (black)

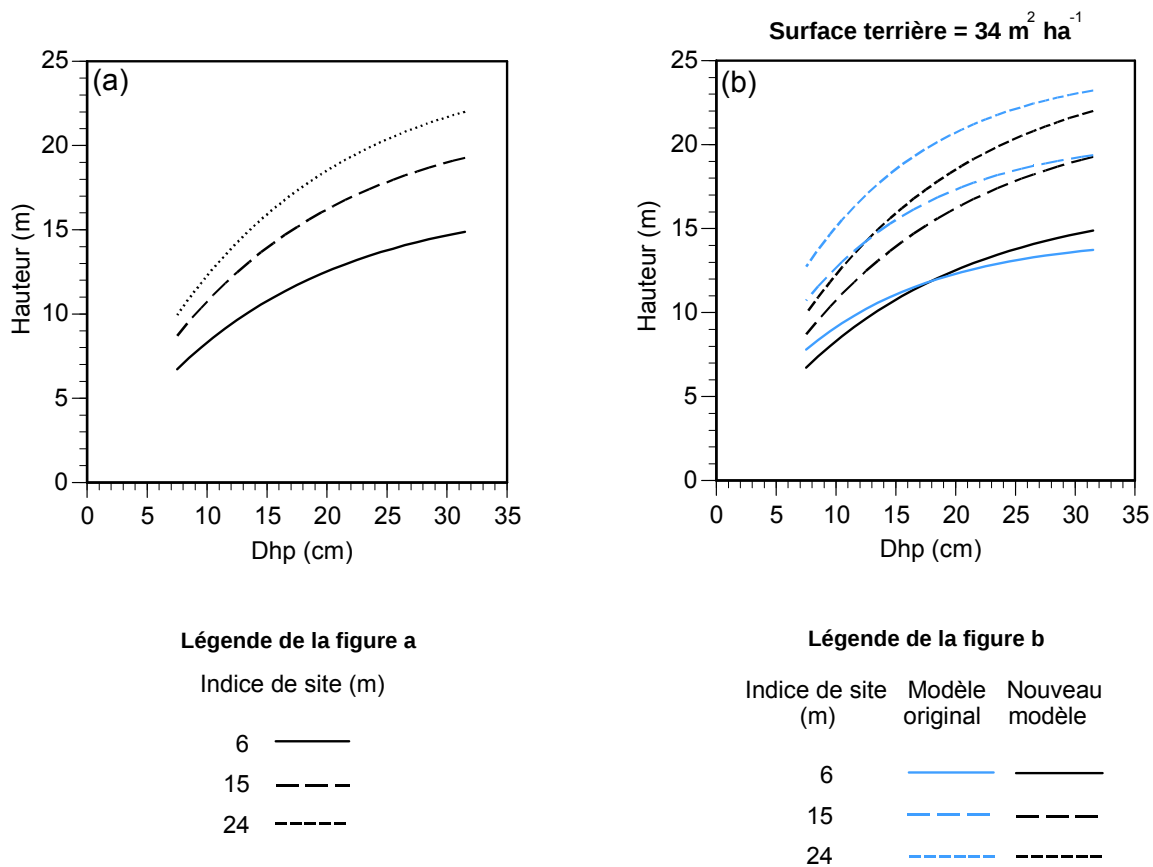
Annexe 5.3 : Hauteur prédite pour le sapin baumier en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



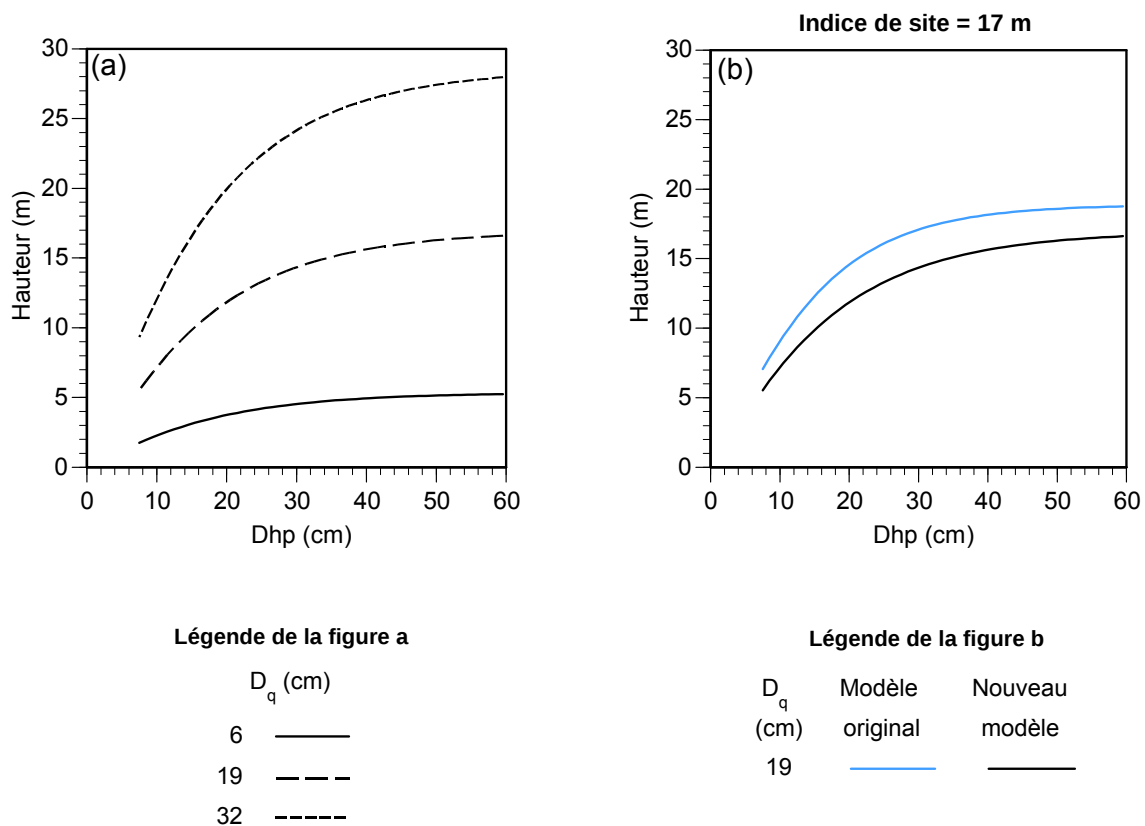
Annexe 5.4 : Hauteur prédite pour l'épinette blanche plantée en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



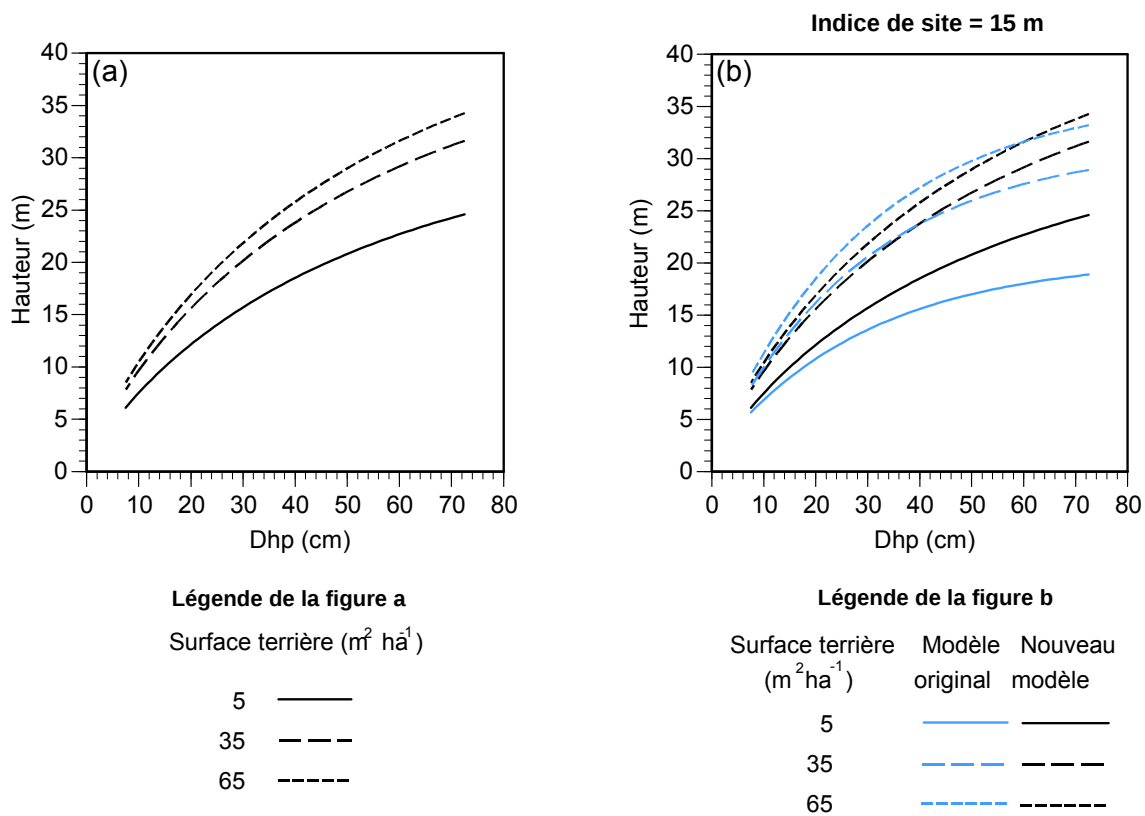
Annexe 5.5 : Hauteur prédite pour le peuplier faux-tremble en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions d'indice de site et de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure d).



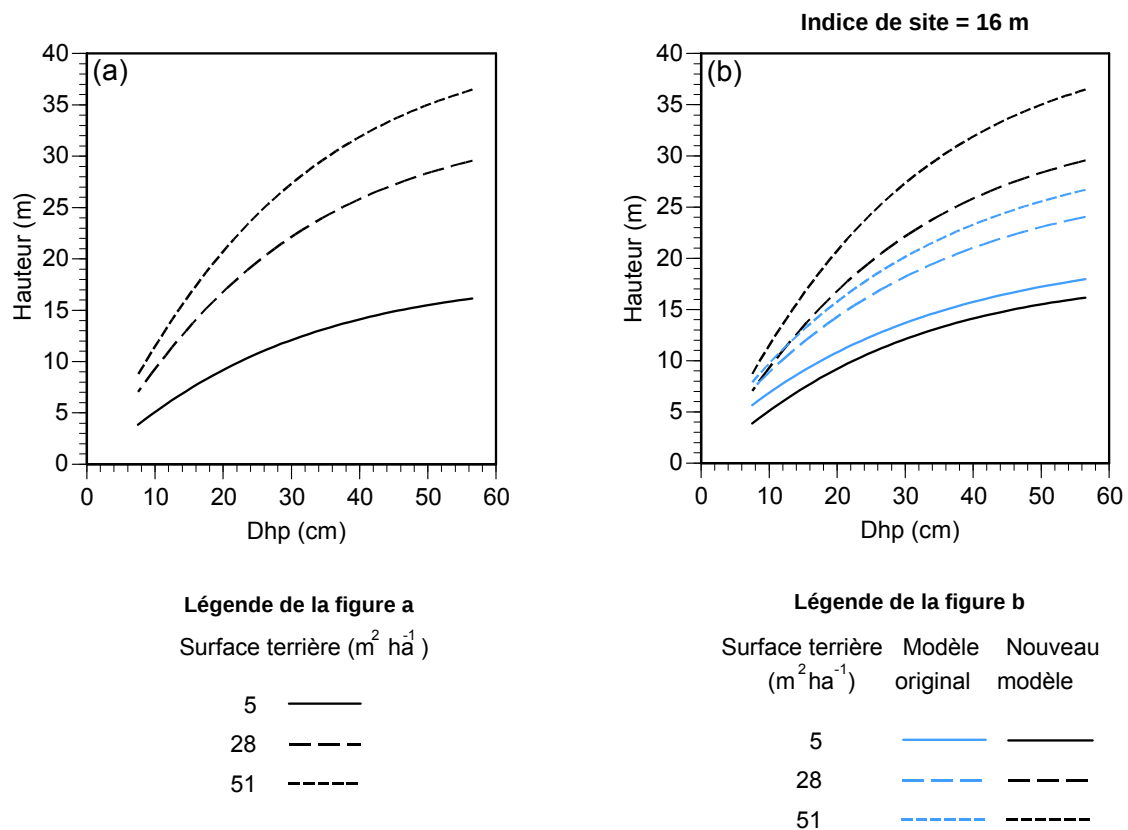
Annexe 5.6 : Hauteur prédite pour le bouleau blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions d'indice de site à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



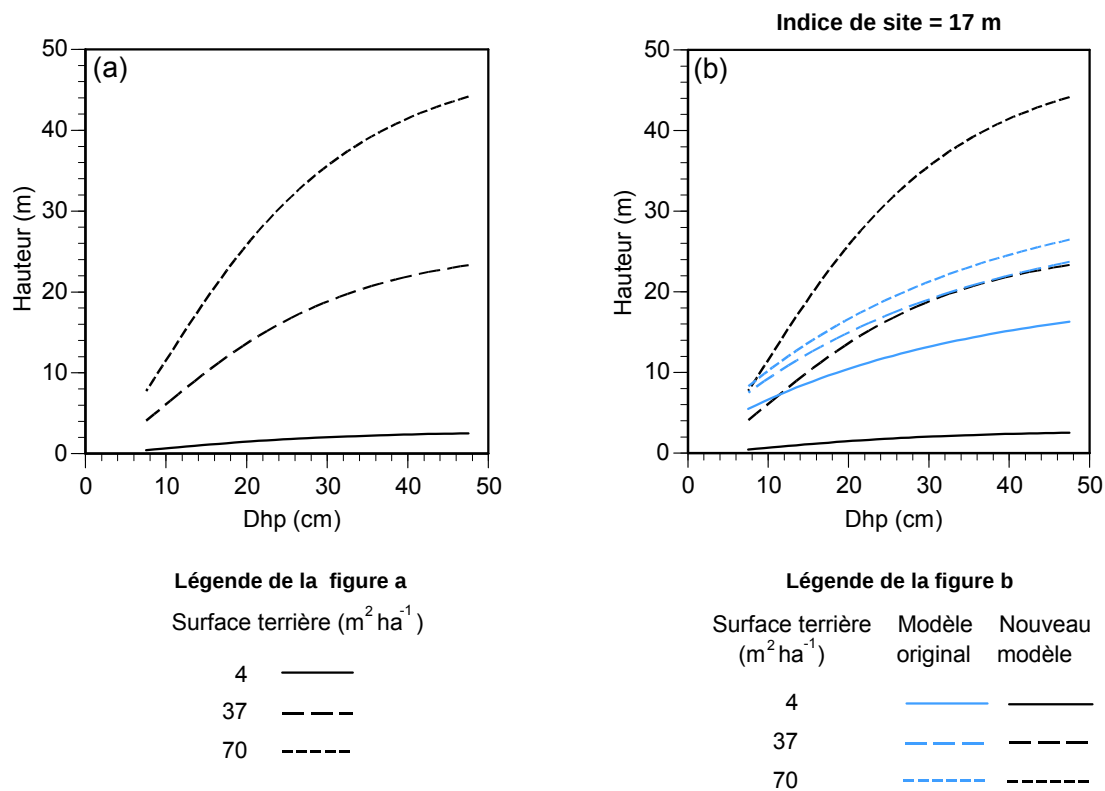
Annexe 5.7 : Hauteur prédite pour l'érable à sucre en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de diamètre quadratique moyen (D_q) à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



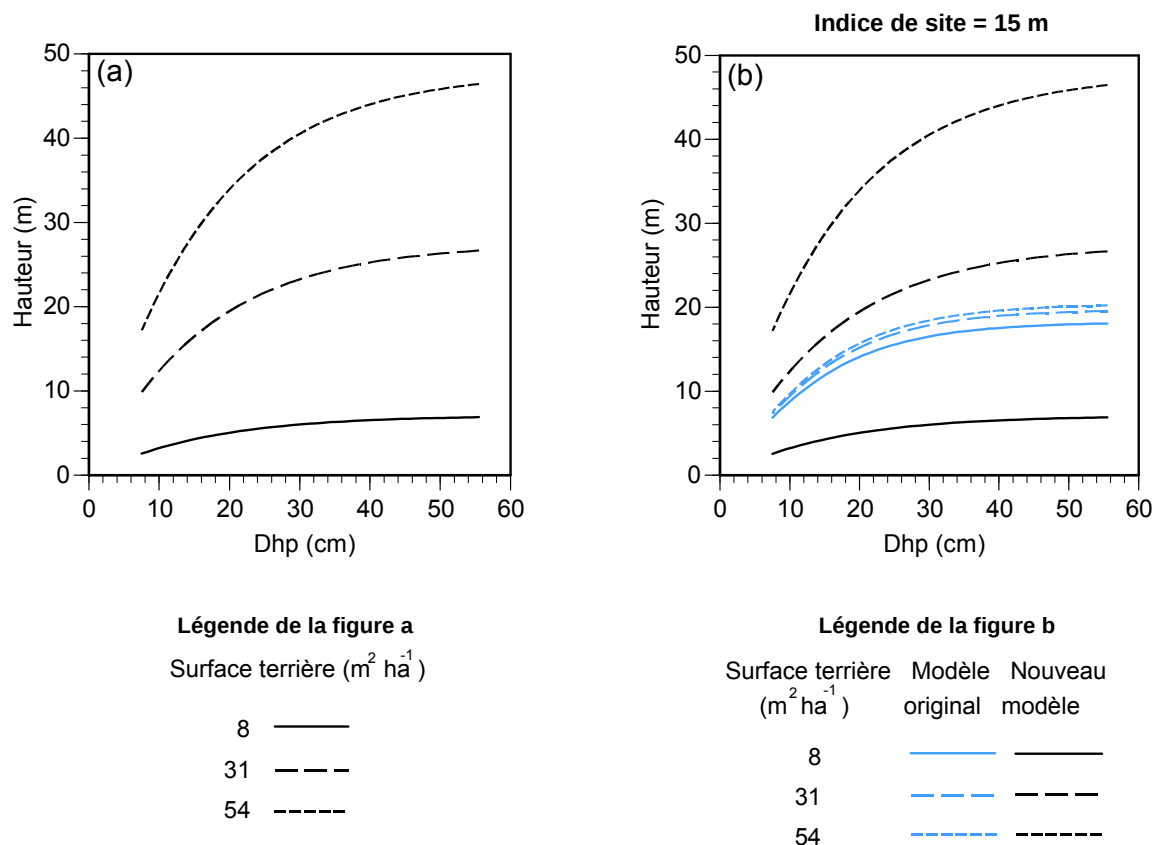
Annexe 5.8 : Hauteur prédite pour le pin blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



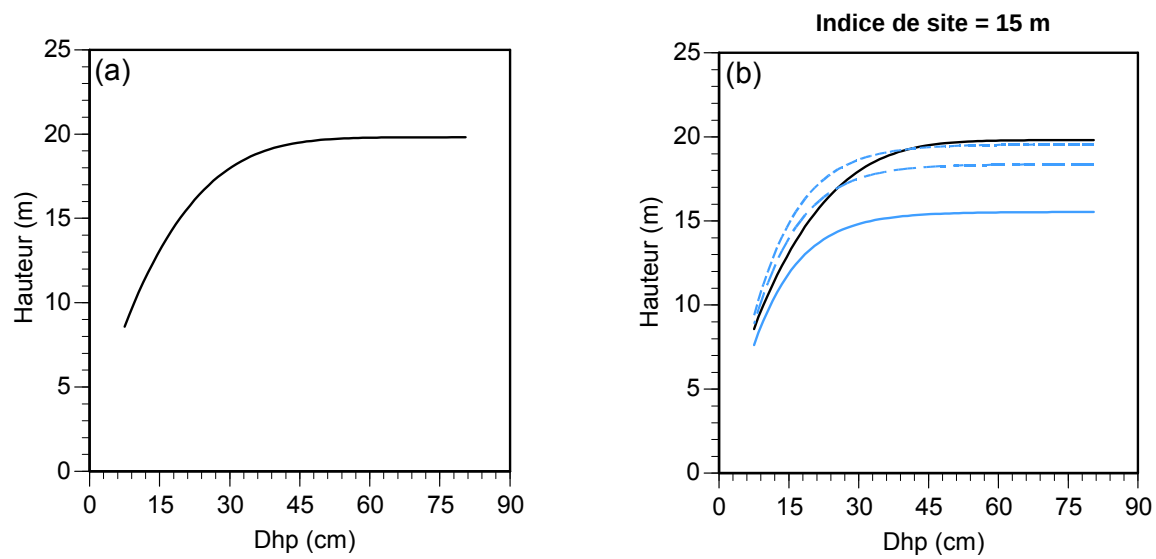
Annexe 5.9 : Hauteur prédite pour le pin rouge en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



Annexe 5.10 : Hauteur prédite pour le pin rouge planté en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



Annexe 5.11 : Hauteur prédite pour le hêtre à grandes feuilles en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



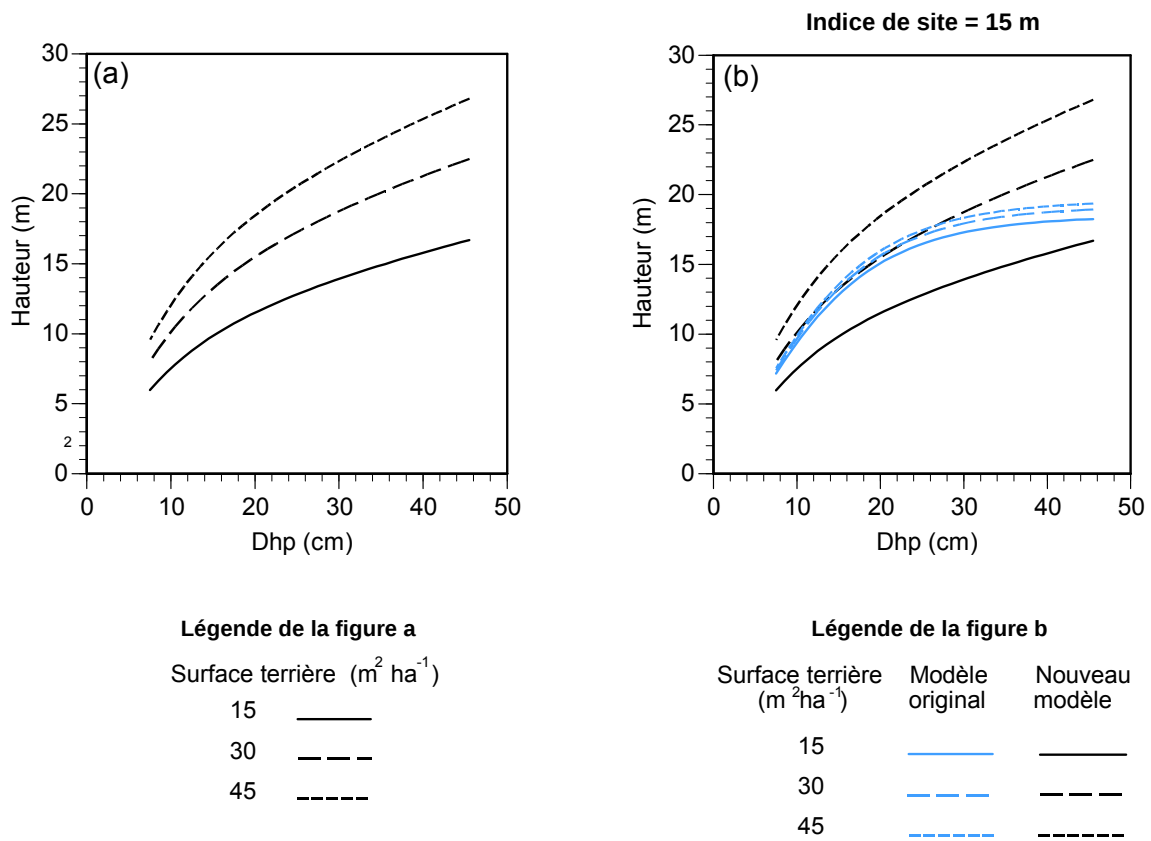
Légende de la figure a
Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)

5 ———
25 - - - -
45 - - - - -

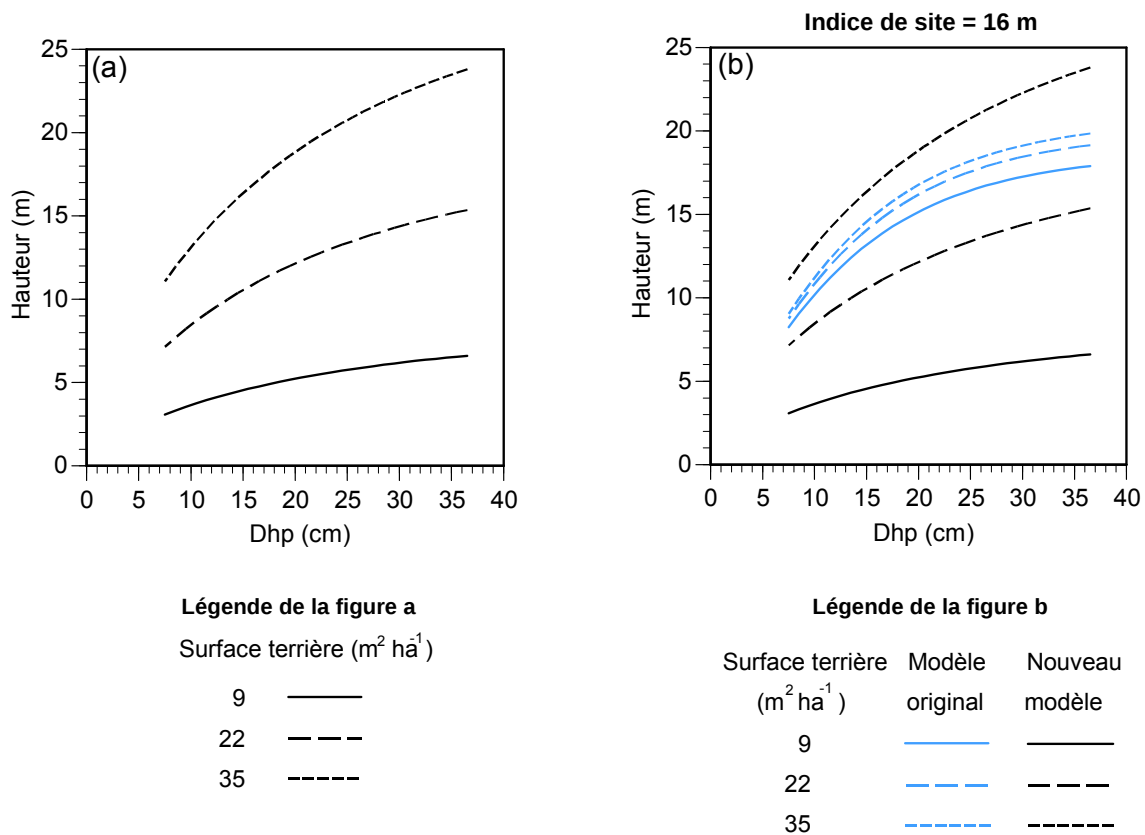
Légende de la figure b
Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) Modèle original Nouveau modèle

5 ——— ———
25 - - - - - - - -
45 - - - - - - - - - -

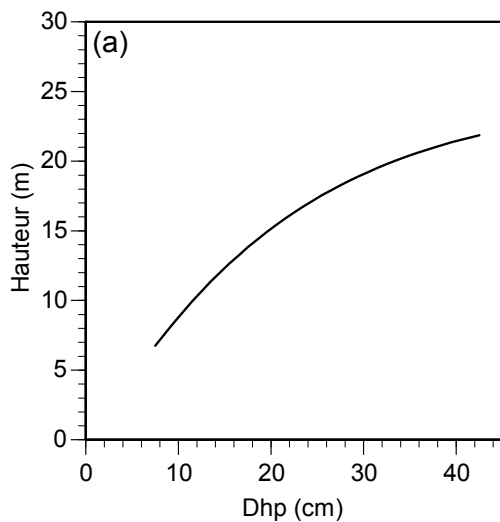
Annexe 5.12 : Hauteur prédite pour le bouleau jaune en peuplements naturels en fonction du dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



Annexe 5.13 : Hauteur prédite pour le tilleul d'Amérique en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



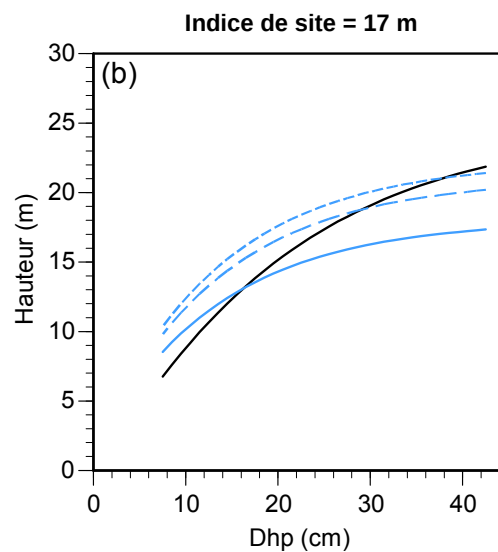
Annexe 5.14 : Hauteur prédite pour l'ostryer de Virginie, l'érable argenté et le frêne blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).



Légende de la figure a

Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)

5 ———
 23 - - - -
 41 - - - - -

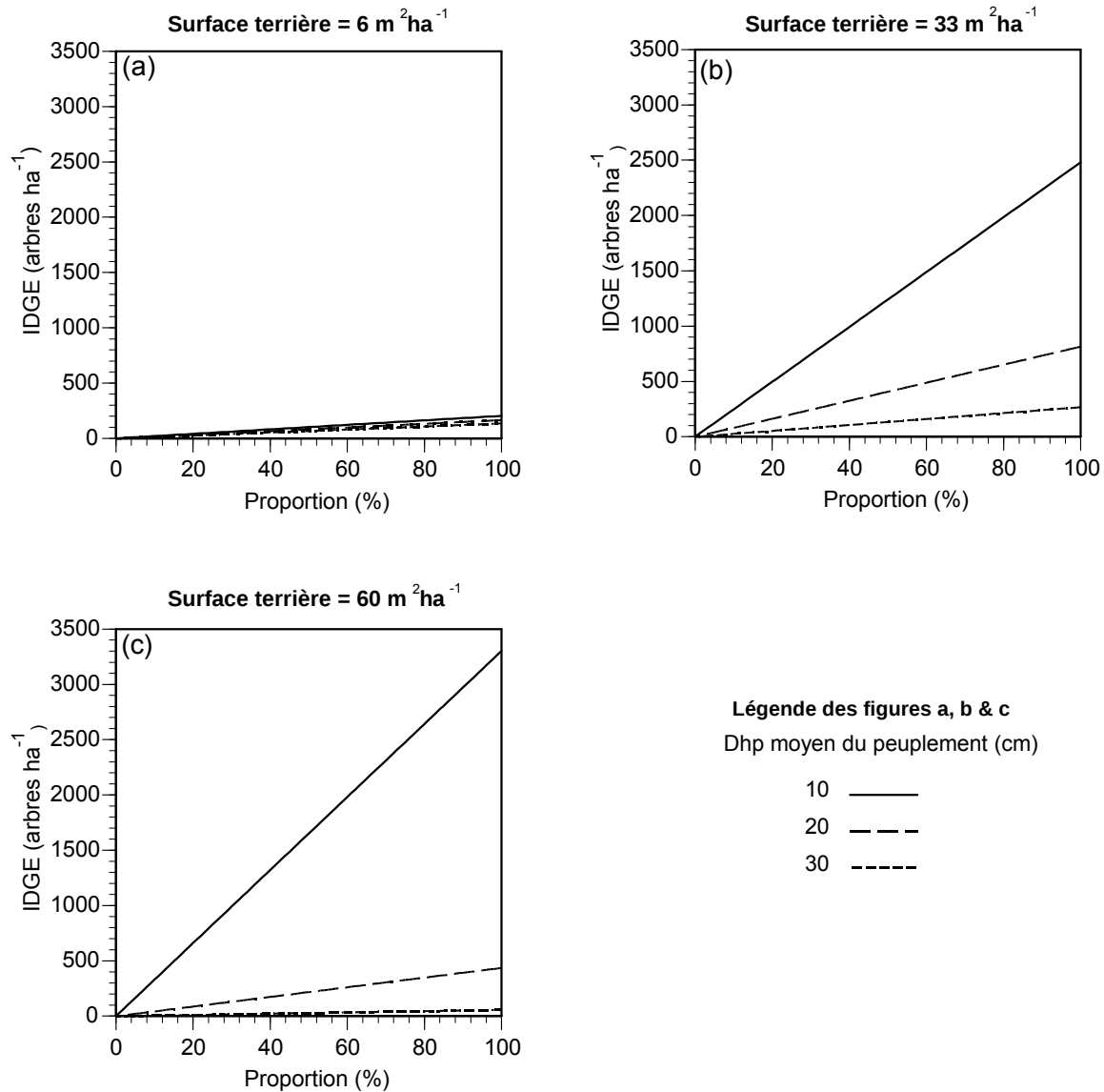


Légende de la figure b

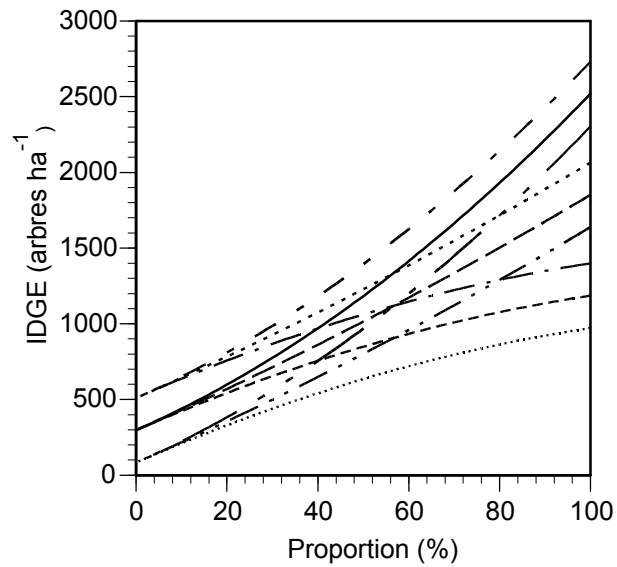
Surface terrière ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Modèle original	Nouveau modèle
5	— (blue dashed)	— (black solid)
23	- - (blue dashed)	- - (black dashed)
41	- - - (blue dashed)	- - - (black dashed)

Annexe 5.15 : Hauteur prédite pour le chêne rouge en peuplements naturels en fonction du dhp à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figure a) et comparaison des modèles originaux de FVS avec les nouveaux modèles dérivés (figure b).

Annexe 6. Analyse de cohérence biologique pour des modèles d'indice de densité de groupes d'espèces

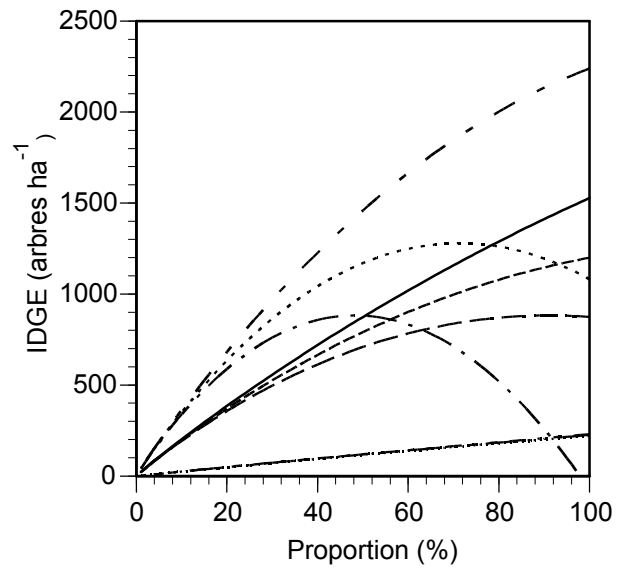


Annexe 6.1 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe d'espèces de l'épinette noire en fonction de la proportion d'épinettes noires dans le peuplement pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS (figures a, b et c).



Légende			
D _q	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)		
(cm)	10	35	60
3	---	—	- -
12	— . . .	— — —	
21		— — — —	— . —

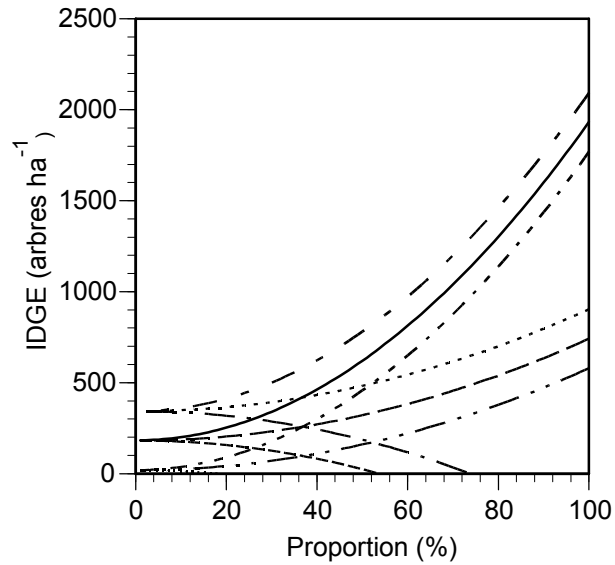
Annexe 6.2 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe d'espèces du pin gris en fonction de la proportion de pin gris dans le peuplement pour différentes conditions de diamètre quadratique moyen (D_q) et de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Légende

Dhp moyen du peuplement (cm)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)		
	3	26	49
10	---	—	- -
20	— . .	— — —	
30		-----	— . —

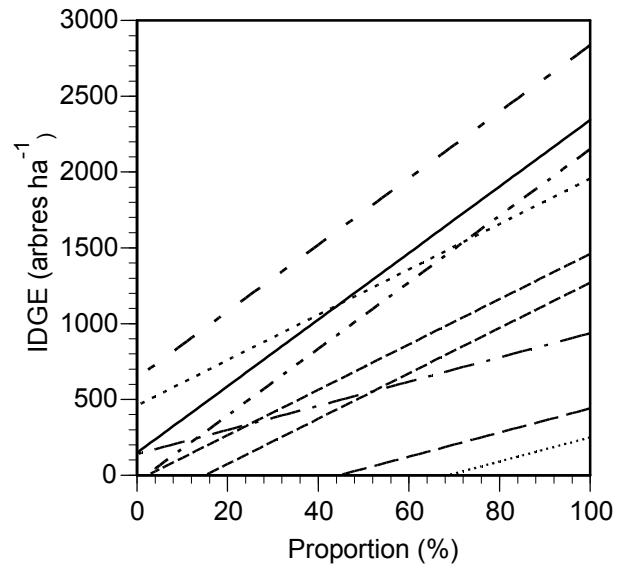
Annexe 6.3 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe de l'épinette blanche en fonction de la proportion d'épinettes blanches plantées pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Légende

Dhp moyen du peuplement (cm)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)		
	3	26	49
10	---	—	- -
20	— . .	— — —	
30		-----	— . —

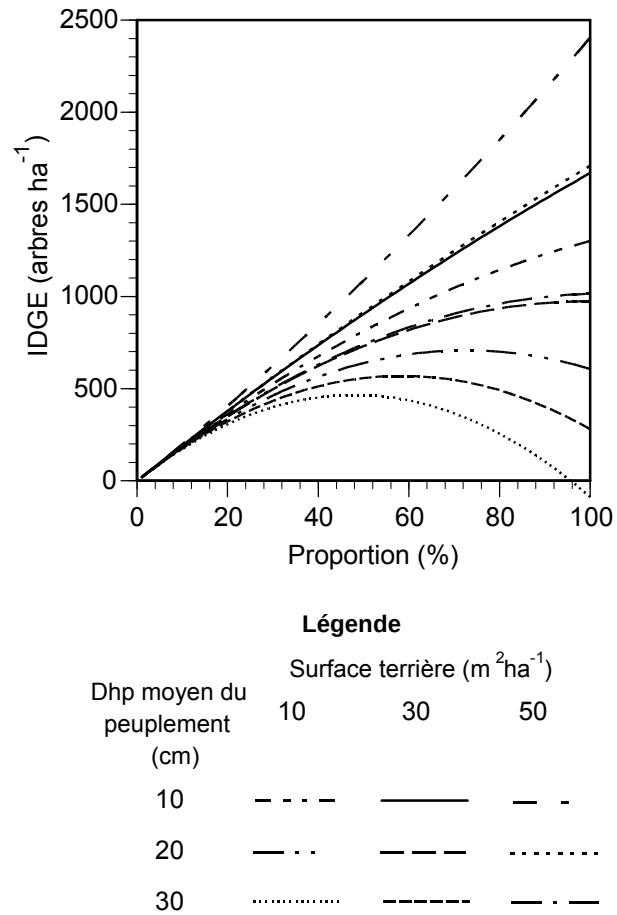
Annexe 6.4 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe d'espèces du peuplier faux-tremble en fonction de la proportion de peupliers faux-trembles dans le peuplement pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



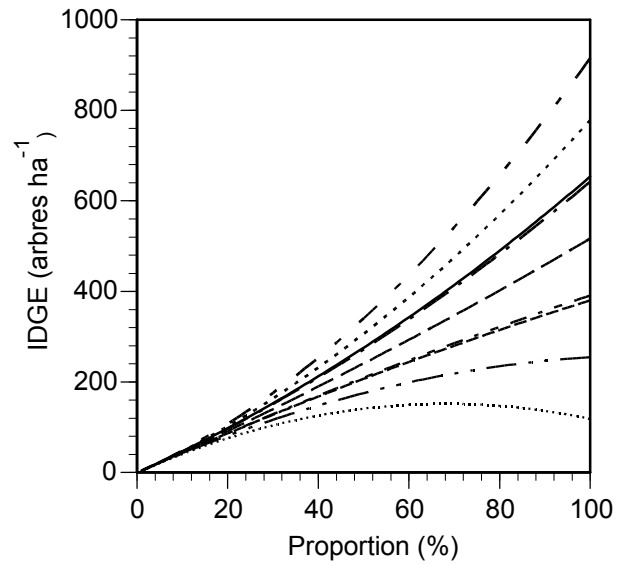
Légende

D_q (cm)	4	36	68
8	— · — · —	—————	— · —
18	— · ·	— · — · —	·····
28	·····	— · — · —	— · —

Annexe 6.5 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe du bouleau blanc en fonction de la proportion de bouleaux blancs dans le peuplement pour différentes conditions de diamètre quadratique moyen (D_q) et de surface terrière à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



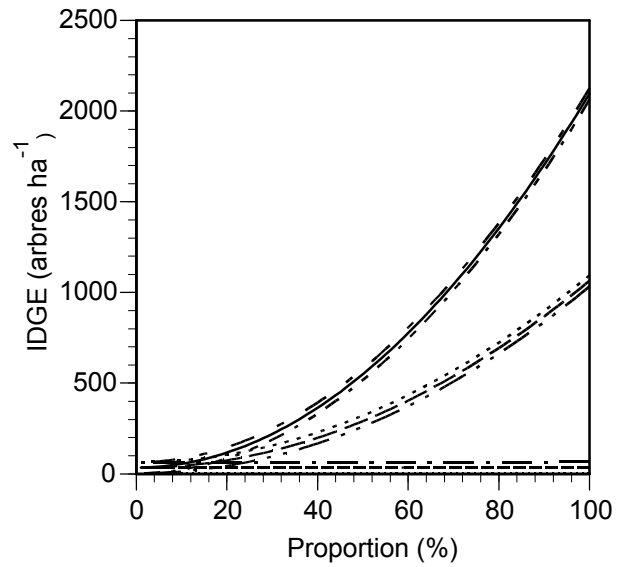
Annexe 6.6 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe du pin rouge et du pin blanc en fonction de la proportion de pins blancs et de pins rouges dans le peuplement pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Légende

Dhp moyen du peuplement (cm)	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)		
	3	26	49
10	— · — · —	———	— · —
25	— · — · —	———	·····
40	·····	———	— · —

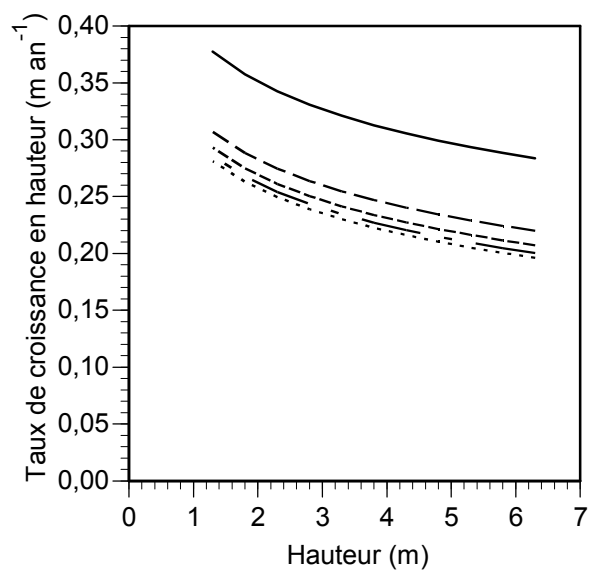
Annexe 6.7 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe des bois francs nordiques en fonction de la proportion de bois francs nordiques pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen du peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Dhp moyen du peuplement (cm)	Légende		
	Surface terrière (m ² ha ⁻¹)		
	3	26	49
10	- - - -	————	- - -
20	— . .	- - - -	
30		- - - -	- . -

Annexe 6.8 : Indice de densité de groupe d'espèces (IDGE) prédit pour le groupe du chêne rouge en fonction de la proportion de chênes rouges pour différentes conditions de surface terrière et de dhp moyen de peuplement à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.

Annexe 7. Analyse de cohérence biologique pour des modèles de taux de croissance en hauteur des petits arbres



Légende

STG (m² ha⁻¹)

1,9 ———

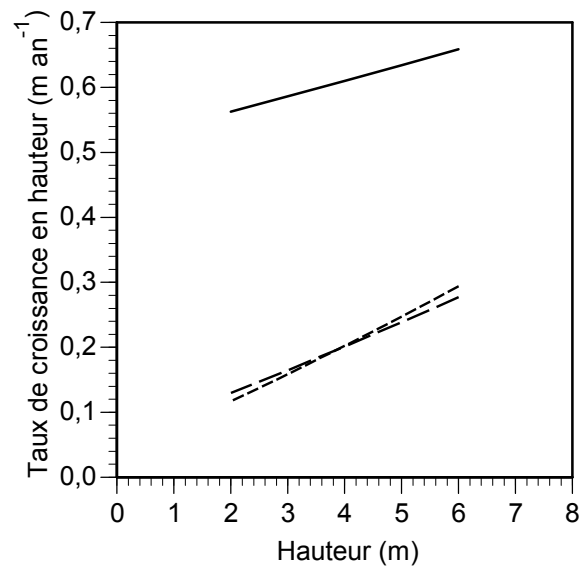
7,9 - - - -

13,9 - - - - -

19,9 — .

25,9

Annexe 7.1 : Taux de croissance en hauteur des petits arbres prédit pour l'épinette noire en peuplements naturels en fonction de la hauteur pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



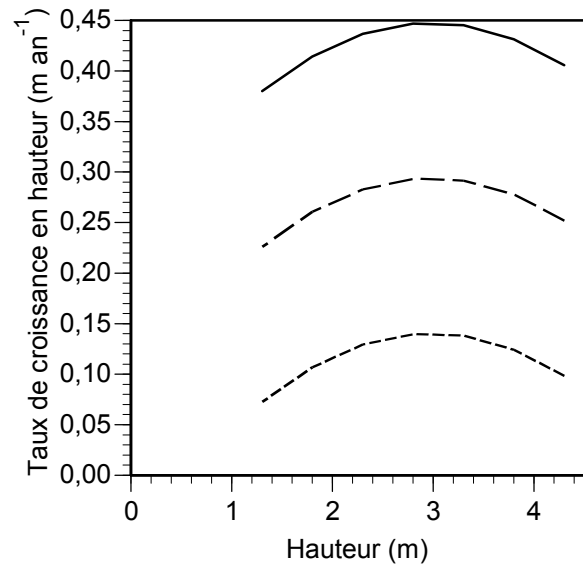
Légende
 STG (m² ha⁻¹)

4 ———

17 - - - -

30

Annexe 7.2 : Taux de croissance en hauteur des petits arbres prédit pour le sapin baumier en peuplements naturels en fonction de la hauteur pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Légende

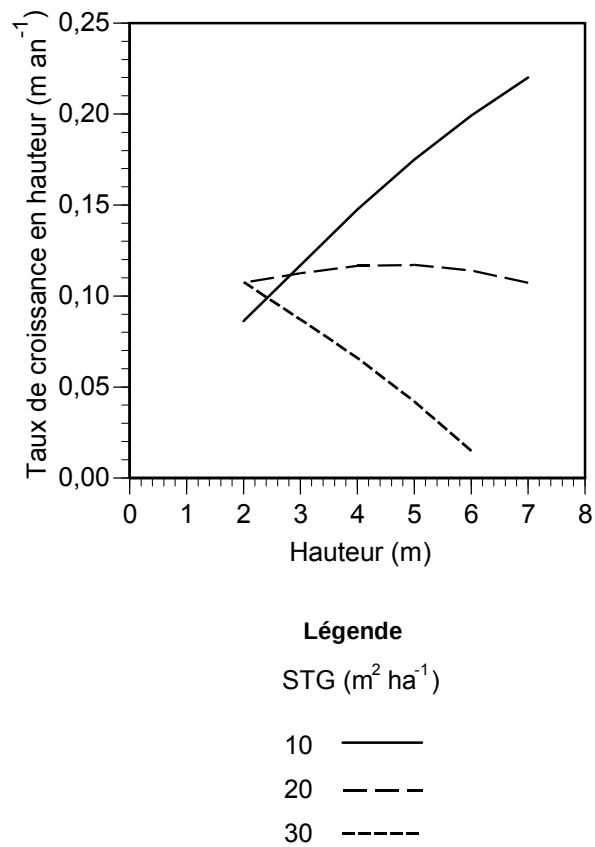
STG (m² ha⁻¹)

0,1 ———

8,1 - - - -

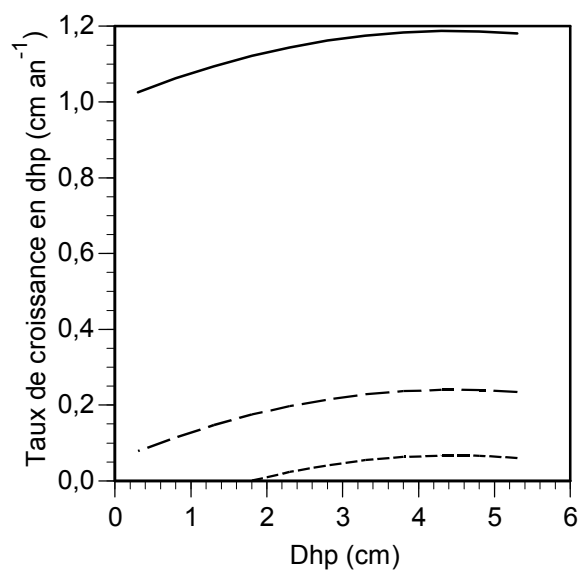
16,1 - . - . -

Annexe 7.3 : Taux de croissance en hauteur des petits arbres prédit pour l'épinette blanche plantée en fonction de la hauteur pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Annexe 7.4 : Taux de croissance en hauteur des petits arbres prédit pour le pin blanc en peuplements naturels en fonction de la hauteur pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.

Annexe 8. Analyse de cohérence biologique pour des modèles de taux de croissance en dhp des petits arbres



Légende

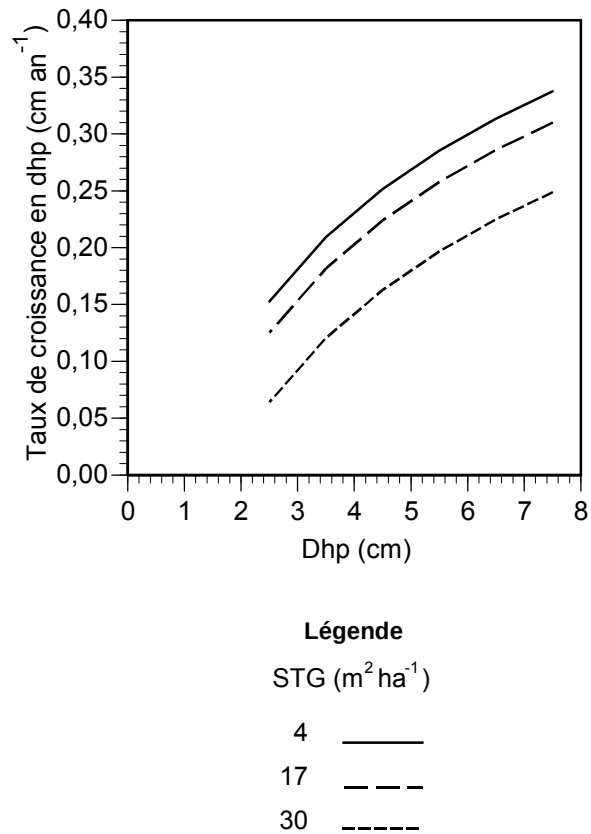
STG (m² ha⁻¹)

0,3 ———

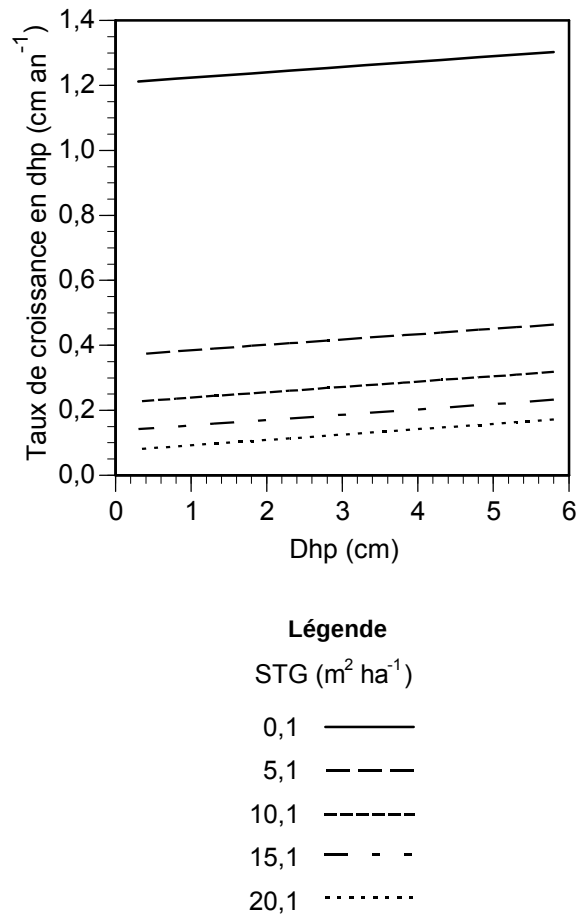
12,3 - - -

24,3

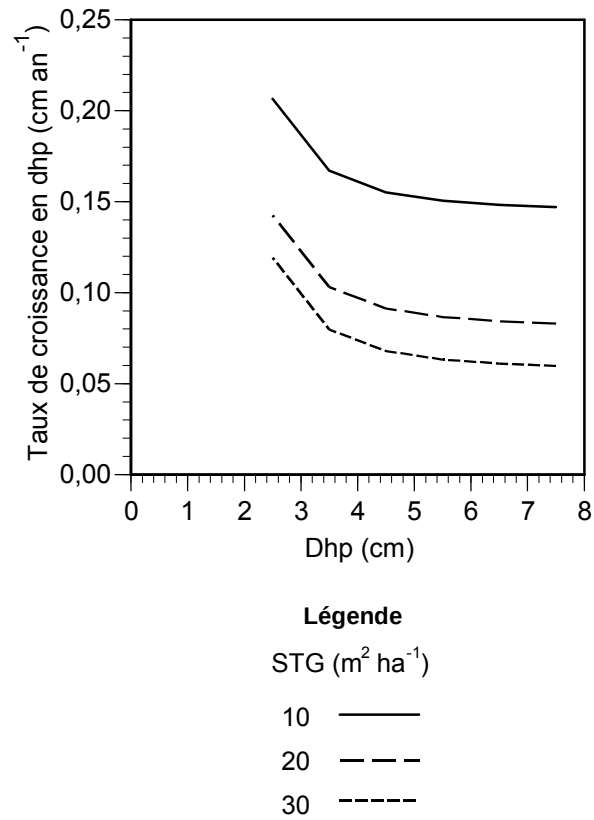
Annexe 8.1 : Taux de croissance en dhp des petits arbres prédit pour l'épinette noire en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Annexe 8.2 : Taux de croissance en dhp des petits arbres prédit pour le sapin baumier en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Annexe 8.3 : Taux de croissance en dhp des petits arbres prédit pour l'épinette blanche plantée en fonction du dhp pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.



Annexe 8.4 : Taux de croissance en dhp des petits arbres prédit pour le pin blanc en peuplements naturels en fonction du dhp pour différentes conditions de STG à l'aide du nouveau modèle dérivé pour FVS.